

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.31.16.19-TDI

DETECÇÃO DE DEFORMAÇÕES SUPERFICIAIS NA MINA DO MANGANÊS DO AZUL ATRAVÉS DA INTERFEROMETRIA DE RADAR ORBITAL

Carolina de Athayde Pinto

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Waldir Renato Paradella, e José Claudio Mura, aprovada em 25 de agosto de 2015.

 $\label{eq:url} \begin{tabular}{ll} $\tt URL do documento original: \\ &< http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JUHDQH> \end{tabular}$

INPE São José dos Campos 2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dra Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.31.16.19-TDI

DETECÇÃO DE DEFORMAÇÕES SUPERFICIAIS NA MINA DO MANGANÊS DO AZUL ATRAVÉS DA INTERFEROMETRIA DE RADAR ORBITAL

Carolina de Athayde Pinto

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Waldir Renato Paradella, e José Claudio Mura, aprovada em 25 de agosto de 2015.

 $\label{eq:url} \begin{tabular}{ll} $\tt URL do documento original: \\ &< http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JUHDQH> \end{tabular}$

INPE São José dos Campos 2015 Pinto, Carolina de Athayde.

P658d

Detecção de deformações superficiais na mina do manganês do azul através da interferometria de radar orbital / Carolina de Athayde Pinto. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxxii + 161 p.; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.31.16.19-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadores : Drs. Waldir Renato Paradella, e José Claudio Mura.

1. TerraSAR-X. 2. Interferometria SAR diferencial. 3. Mina de manganês do azul. 4. Província mineral de Carajás. 5. Região Amazônica. I.Título.

CDU 528.88:622.33



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em

Sensoriamento Remoto

Dr.	Waldir Renato Paradella	Walain Renato Paracella
		Presidente / Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP
Dr.	José Claudio Mura	
		Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP
Dr.	Fábio Furlan Gama	
		Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP
Dr.	Arnaldo de Queiroz da Silva	suplar de Grenn da S/-
		Convidado(a) / UFPA / Belém - PA

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

wanimidade unanimidade

Título: "DETECÇÃO DE DEFORMAÇÕES SUPERFICIAIS NA MINA DO MANGANÊS DO AZUL ATRAVÉS DA INTERFEROMETRIA DE RADAR ORBITAL"

Aluno (a): Carolina de Athayde Pinto









AGRADECIMENTOS

Sempre me considerei muito privilegiada por ter encontrado (ou reencontrado) ao logo da vida pessoas muito especiais. Isso não seria diferente nos dois últimos anos, por isso, quero agradecê-las por terem me auxiliado em mais essa caminhada.

Primeiramente, agradeço aos meus amigos espirituais, por estarem sempre comigo, seja nos momentos difíceis ou bons. Ao fechar os olhos sinto vocês auxiliando e iluminando a minha jornada, isso é a minha base.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por ter fornecido a infraestrutura necessária para a execução deste trabalho. Além disso, por ter me proporcionado vários encontros e momentos que me ajudaram a crescer.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pelo apoio financeiro concedido durante os dois anos de pesquisa.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e à Mineradora Vale pelo suporte à pesquisa através do projeto FAPESP-VALE-INPE (Proc. FAPESP 2010/51267-9).

Ao meu orientador Dr. Waldir Renato Paradella, por ter me escolhido para fazer parte desse grupo de pesquisa tão seleto e qualificado, serei eternamente grata. Além disso, por ter me proporcionado um ambiente muito especial para o desenvolvimento desse trabalho. Obrigada pela orientação, principalmente pela ajuda nas interpretações e discussões dos resultados interferométricos e na confecção do artigo.

Ao meu co-orientador Dr. José Claudio Mura, por toda a ajuda, correções, auxílio, preocupação, paciência e disponibilidade que foram essenciais para a execução do processamento interferométrico. Sem você definitivamente não teria conseguido. Seu incentivo e apoio foram fundamentais para que eu tivesse a certeza que tudo daria certo no final.

Ao Dr. Fabio Fulan Gama, pelas dicas valiosas e conversas, que foram essenciais para a execução deste trabalho. Seu sorriso amigo e paterno sempre me incentivou.

Ao Dr. Athos Ribeiro dos Santos, pelo companherismo em campo.

Ao Dr. Arnaldo de Queiroz da Silva, por ter aceitado gentilmente compor a minha banca externa.

Aos companheiros de sala, Marcos, Heloísa e Guilherme pela amizade. Minha gratidão em especial para o amigo Marcos, pela ajuda no processamento DInSAR, e ao Guilherme, por toda ajuda no ArcGIS, Excel e na confecção de figuras.

À equipe de Geotecnia da Vale S.A.: Aristotelina, Léo, Juscelino, Ezequias, pelo material fornecido, além do apoio e conversas no campo.

Às bibliotecárias do INPE, Yolanda, Malu e Simone por mostrarem-se sempre tão prestativas e amáveis.

Ao Dr. Maurício Alves Moreira, por ter me apresentado ao INPE.

Ao Dr. Raimundo Almeida Filho, por ter me apresentado à geologia há alguns anos.

Aos Drs. Sidney Sant´Anna e João Roberto dos Santos, pelas conversas e momentos de risadas, que apesar de breves, me deram ânimo e estímulo para seguir em frente.

Aos amigos e professores do Instituto de Geociências da UNICAMP, lugar onde minha jornada geológica começou. Gostaria de agradecer especialmente a Dr^a Silvia Figueirôa, Dr^a Maria José de Mesquita e Dr. Jefferson Picanço por terem me apresentado à carreira científica que tanto gosto.

As amigas da vida Nina, Bia e Maiara... Aos amigos da geologia: Aline, Francisco, Giseli, Júlia, Lídia, Marquinhos, Mayra e Nathália. Aos colegas Marco Antônio e Gustavo, por concederem artigos sobre a Província Mineral de Carajás.

Aos meus amigos da turma do SERE 2013. Aos meninos, Alex, Denis, Everton, Fábio, Gabriel, Isaque, Leandro, Matheus, Thiago, Vinícius e William. Especialmente para as meninas: Aninha, Denise, Emily, Lore e Tássia. Vocês todos tornaram tudo muito mais especial e divertido!!!

À Arina, por toda a ajuda, por te me feito crescer nesses dois anos de convívio.

À Carina, por ser minha amiga e irmã desde o cursinho. Obrigada por sempre me ouvir, me interar do mundo das séries, me acompanhar nas frituras e nos sonhos. Sua amizade é importante demais para mim. Te quero para sempre!

A minha amiga Liliane, por ser minha amiga da alma. Desde a oitava série, não há um dia sequer que eu não pense em você! Obrigada por existir e ser tão especial para mim! Isso não há distância nem tempo que mude.

A minha família: Pai, Mãe, Lu, Léo, Má, Vó, incluindo Fred, Max, Dalila, Céu. Vocês são essenciais, obrigada por existirem, sem vocês definitivamente não estaria aqui.

Ao Vitor por tudo, tudo! A vida se torna mais linda porque você existe.



RESUMO

A Mina do Azul, inserida na Província Mineral de Carajás, região Amazônica, é a mina de manganês a céu aberto mais importante do Brasil. A Vale S.A. opera na área com três cavas simultaneamente (minas 1, 2 e 3), que são associadas a produtos de rochas de alteração de baixa qualidade geomecânica com arenitos, siltitos e coberturas lateríticas da Formação Águas Claras. Com o intuito de monitorar possíveis deformações no terreno, foram utilizadas na investigação 33 imagens TerraSAR-X (TSX-1), no formato StripMap, que abrangem o período de 20 março de 2012 a 4 abril de 2013. As cenas foram processadas utilizando duas abordagens interferométricas: DInSAR Convencional (Interferometria SAR Diferencial) e DInSAR Avancada. As abordagens DInSAR Avancada empregadas são baseadas na Interferometria por Espalhadores Persistentes (PSI) e DInSAR Times Series. Os resultados mostraram que a maior parte das minas pode ser considerada estável no período de cobertura de aquisição das imagens SAR. No entanto, as maiores taxas de deformações foram detectadas nas pilhas de estéril, provavelmente relacionadas a mecanismos de recalque, e também ao longo dos taludes do flanco norte da Mina 1, indicando movimentos em direção ao centro da mina. Nesse setor da mina, a relação espacial das estruturas geológicas com os PS mostrou que as maiores taxas de deformação estão concentradas ao longo do corredor de deformação composto por falhas, fraturas e dobras, relacionado ao Sistema de Falhas Carajás. Medidas de radar de campo de um curto período de cobertura do TSX-1, para as paredes das bancadas do flanco sul da Mina 1, mostraram que o padrão de deformação dos PS é concordante com as medidas geotécnicas de campo. Assim, a investigação enfatizou a importância que a DInSAR orbital pode ter no monitoramento da deformação e na avaliação dos riscos nesse tipo de mineração.

Palavras-Chave: TerraSAR-X, Interferometria SAR Diferencial, Mina de Manganês do Azul, Província Mineral de Carajás, Região Amazônica



DETECTION OF SURFACE DISPLACEMENTS IN THE AZUL OPEN PIT MANGANESE MINE BY USING SYNTHETIC APERTURE RADAR INTERFEROMETRY

ABSTRACT

The Azul mining complex, located in the Carajás Mineral Province, Amazon region, encompasses the most important manganese mine in Brazil. Vale S.A. company operates in the area three simultaneous excavations (mines 1, 2 and 3), which are conducted on rock alteration products of low geomechanical quality related to sandstones, siltstones and a lateritic cover. In order to monitor ground deformation, 33 TerraSAR-X (TSX-1) StripMap images covering the period of March 2012- April 2013 were used in the investigation. The scenes were processed based on two interferometric approaches: the Conventional DInSAR (Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry) and the Advanced DInSAR (A-DInSAR). A-DInSAR approaches based on Persistent Scatterer Interferometry (PSI) analysis and DInSAR Times Series were used and these results showed that most of the area was considered stable during the time span of the SAR acquisitions. However, a high deformation rates were mapped over a waste pile, probable related to settlements, and also along the north flank of mine 1, indicative of cut slope movements toward the center of the pit. A spatial relationship of geological structures with Persistent Scatterers (PS) was observed for this sector of the mine, given by PS showing deformation rates concentrated along a structural corridor with faults, fractures and folds related to the Caraiás Fault system. Despite only ground-based radar measurements were available for a short time period of the TSX-1 coverage, for wall benches along the south flank of mine 1. the PS movement patterns showed concordance with geotechnical field measurements. The investigation emphasized the important role that satellite-based DInSAR can play for deformation monitoring and risk assessment in this kind of mining area.

Keywords: TerraSAR-X, Differential SAR Interferometry, IPTA, open pit manganese mine, Carajás Province, Amazon region



LISTA DE FIGURAS

<u>Pág</u> .
Figura 1.1 - Metodologias adotadas5
Figura 2.1 - Nomenclatura das bandas de radar8
Figura 2.2 - Transmitância atmosférica para a faixa das microondas8
Figura 2.3 - Direções de propagação do campo elético: polarização vertical e polarização horizontal9
Figura 2.4 - Geometria de imageamento do sistema radar de visada lateral (SLAR) 10
Figura 2.5 - Principais modos de operação do sistema SAR: (a) <i>StripMap</i> , (b) <i>ScanSAR</i> e (c) <i>Spotlight</i> 11
Figura 2.6 - Direções de visada do sistema SAR12
Figura 2.7 - Relação entre os ângulos de incidência (θ_i) , incidência local (θ_{loc}) e de declividade (α_i) , sendo $\theta_{loc} = \theta_i$ - α_i .
Figura 2.8 - Resultados dos processamentos 1, 10 e 100 Looks15
Figura 2.9 - Modos de imageamento do TSX-116
Figura 2.10 - A fase (φ) é o ângulo (posição angular) que o vetor faz com o eixonorizontal17
Figura 2.11 - Geometria do imageamento InSAR. As duas antenas (SAR ₁ e SAR ₂) estão separadas a uma distância B denominada linha de base, R ₁ e R ₂ correspondem a distância em alcance e h a altitude do terreno com relação a uma superfície de eferência
Figura 2.12 - Inteferograma da Mina do Manganês do Azul19
Figura 2.13 - Imagem de coerência interferométrica da Mina do Manganês do Azul (C) ormada a partir da imagem de referência (A) e escrava (B). As porções escuras da magem representam a Floresta Amazônica (baixa coerência) e as em branco a área da Mina do Manganês do Azul (alta coerência)21
Figura 2.14 - Geometria da interferometria SAR diferencial ilustrando uma deformação do terreno (d) ocorrida entre a primeira e a segunda aquisição das imagens. Sendo h a altitude do terreno e do deslocamento provocado por uma deformação do terreno25

Figura 2.15 - Ilustração das fases no processamento DInSAR de duas passagens.... 27

Figura 2.16 - Comportamento da fase interferométrica durante as aquisições de uma célula de resolução, (a) célula de resolução com espalhadores aleatórios e (b) célula de resolução com espalhador dominante e estável
Figura 2.17 - Ilustração a modelagem de processamento da metodologia IPTA35
Figura 3.1 - Configuração geral de cava em mina a céu aberto
Figura 3.2 - Componentes de tensão bidimensional : (A) Equilíbrio bidimensional, (B) Plano qualquer
Figura 3.3 - Sistema de Classificação Geomecânica RMR50
Figura 3.4 - Tipos de Instabilidade em taludes rochosos
Figura 3.5 - Técnicas de um sistema de monitoramento de taludes em mina a céu aberto
Figura 3.6 - Deformação acumulada (LoS) do SSR: (A) Fotografia digitalizada da área; (B) "Mapa de calor" da deformação da área digitalizada. (c) Perfil da deformação para as áreas selecionadas (retângulos)
Figura 4.1 - Localização da área de estudo e configuração geral das minas 1, 2 e 357
Figura 4.2 - Pluviometria mensal da Mina do Manganês do Azul para o período das imagens TSX-1. As linhas vermelhas indicam as datas de aquisição das 33 imagens.
59
Figura 4.3 - Mapa Geológico do Domínio Carajás60
Figura 4.4 - Mapa geológico simplificado de Carajás evidenciando os sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento
Figura 4.5 - Coluna Estratigráfica das unidades pré-cambrianas da PMC64
Figura 4.6 - Modelo deposicional para a Formação Águas Claras
Figura 4.7 - Perfil laterítico das minas de manganês do Azul71
Figura 4.8 - Bloco diagrama representando a geometria das estruturas na Mina do Manganês do Azul. A falha principal com cinemática NW-SE divide a área da mina em dois blocos: um baixo a sul (menos deformado) e um alto a norte (mais deformado). 74
Figura 4.9 - Mapa geológico da Mina do Manganês do Azul
Figura 4.10 - Mapa de graus de alteração da Mina do Manganês do Azul77
Figura 4.11 - Mapa de graus de consistência da Mina do Manganês do Azul78
Figura 4.12 - Famílias de fraturas em Pelito Tabular

Figura 4.13 - Classes geomecânicas RMR para a Mina do Manganês do Azul 84
Figura 4.14 - Rupturas planares e em cunha ocasionadas por famílias de fraturas no flanco norte da Mina 1
Figura 4.15 - Plano de lavra da Mina do Manganês do Azul, em vermelho estão as áreas que foram lavradas no período de: (A) 2012 e (B) 201389
Figura 5.1 - Imagem <i>StripMap</i> geocodificada do TSX-1, com destaque em vermelho da área de estudo
Figura 5.2 - Fluxograma de atividades de pesquisa93
Figura 5.3 - Escorregamentos nos taludes de bancada do flanco norte da Mina 1 94
Figura 5.4 - Etapas do processamento DInSAR simples. Na etapa do préprocessamento é feito o corregistro entre a imagem escrava (B) em relação a imagem mestre (A). A partir da imagem (C) devidamente corregistrada, são obtidos dois produtos interferométricos: a imagem de coerência (D) e o interferograma complexo (E). Na próxima etapa, o software simula a fase referente à topografia a partir do MDE (F) e posteriormente subtrai com o interferograma complexo, obtendo o interferograma diferencial (G). A partir de então, atribui-se um valor de deslocamento em LoS para a diferença de fase (H). Na próxima etapa, é feita a geocodificação (I) e posteriomente tem-se o mapa de deformação final (J)
Figura 5.5 - Registro das imagens SLC em relação a imagem mestra98
Figura 5.6 - Fluxograma de processamento da metodologia DInSAR-TS99
Figura 5.7 - Mapa de deformação (LoS) DInSAR-TS100
Figura 5.8 - Procedimento metodológico do PSInSAR no módulo IPTA101
Figura 5.9 - Seleção da lista de candidatos a PS na Mina 1 do Complexo do Azul a partir dos critérios (A) Variabilidade temporal; (B) Diversidade espectral; (C) Fusão de (A) e (B)
Figura 5.10 - Representação das fases interferométricas de um PS em relação a imagem Mestre, para um conjunto de N imagens
Figura 5.11 - Interferogramas da Mina 1 do Complexo do Azul (A) Interferograma complexo; (B) Interferograma sintético; (C) Interferograma diferencial
Figura 5.12 - Regressão bidimensional da diferença de fase interferométrica diferencial entre um PS e o ponto de referência, para um conjunto de 18 interferogramas (pontos no gráfico) gerados para a Mina do Manganês do Azul: (a) Fase x B _n e (b) Deformação x tempo

Figura 6.1a - Mapas de deformação LoS para o período seco (20/03/2012 a 27/06/2012) - DInSAR simples
Figura 6.1b - Mapas de deformação LoS para o período seco (27/03/2012 a 04/10/2012) - DInSAR simples
Figura 6.2a - Mapas de deformação LoS para o período chuvoso (04/10/2012 a 11/01/2012) - DInSAR simples
Figura 6.2b - Mapas de deformação LoS para o período seco (22/01/2013 a 20/04/2013) - DInSAR simples
Figura 6.3 - Exemplos de pares interferométricos com deformações nos flancos norte e sul da Mina 1: (a) 20120320_20120331; (b) 20120503_20120514; (c) 20120514_20120524; (d) 20120605_20120616; (e) 20120708_20120719; (f) 20121004_20121015.
Figura 6.4 - Exemplos de pares interferométricos com deformações na Pilha de Estéril Norte: (a) 20120411_20120422; (b) 20120503_20120514; (c) 20120616_20120627; (d) 20120627_20120708; (e) 20120821_20120901; (f) 20121026_20121106
Figura 6.5 - Localização do ponto de referência adotado
Figura 6.6 - Pares de interferogramas para o período seco
Figura 6.7 - Mapas de deformação LoS para o período seco - DInSAR TS119
Figura 6.8 - Disposição dos pontos de deformação no flanco norte da Mina 1 - DInSAR TS
Figura 6.9 - Pares de interferogramas para o período seco
Figura 6.10 - Mapa de deformação LoS para o período chuvoso (22/01/2013 a 20/04/2013) - DInSAR TS
Figura 6.11 - Mapas de deformação LoS para o período seco - PSI126
Figura 6.12 - Disposição dos PS nos flancos norte e sul - PSI
Figura 6.13 - Mapas de deformação LoS para o período chuvoso - PSI129
Figura 6.14 - Disposição dos PS nos flancos norte e sul - PSI
Figura 7.1 - Deformação acumulada (LoS) do SSR: (A) Fotografia digitalizada do Flanco Sul da Mina 1; (B) "Mapa de calor" da deformação da área digitalizada; (c) Perfil da deformação para a área selecionada (retângulo vermelho)
Figura 7.2 - Esquema de geometrias de visada TSX-1 e SSR com dados de deformação (LoS) PSI

Figura 7.3 - Perfis de deslocamento para três pontos (A, B, C) segundo a visada TSX 1, localizados ao longo da direção de visada SSR no flanco sul
Figura 7.4 - Esquema de geometrias de visada TSX-1 e SSR com dados de deformação (LoS) DInSAR TS
Figura 7.5 - Perfis de deslocamento para três pontos (A', B', C') segundo a visada TSX-1, localizados ao longo da direção de visada SSR da base flanco
Figura 7.6 - Alçamento aparente do terreno
Figura 8.1 - Mapas de deformação (LoS) DInSAR TS, onde A indica o valor máximo de deslocamento que reflete afastamento em relação ao sensor equanto B a aproximação. Na figura, o período seco é representado à esqueda e o chuvoso à direita
Figura 8.2 - Perfis de A e B para o (a) Período seco e o (b) Período Chuvoso - DInSAR TS
Figura 8.3 - Nos mapas de deformação (LoS) PSI , onde A indica afastamento em relação ao sensor e B a aproximação. Na figura, o período seco é representado à esqueda e o chuvoso à direita
Figura 8.4 - Perfis de A e B para o (a) Período seco e o (b) Período Chuvoso - PSI. 140
Figura 8.5 - Distribuição dos PS e das estruturas na Mina 1 (período seco)
Figura 8.6 - Distribuição dos PS e das estruturas na Mina 1 (período seco)
Figura 8.7 - Surgência de água nas fraturas do siltito



LISTA DE TABELAS

<u>Pág</u> .
Tabela 2.1 - Modos de operação do TerraSAR-X
Tabela 2.2 - Exemplos de aplicações da abordagem DInSAR em minas a céu aberto.
Tabela 2.3 - Exemplos de aplicações da abordagem A-DInSAR em minas a céu aberto
Tabela 3.1 - Graus de alteração das rochas segundo o IPT
Tabela 3.2 - Classificação de rochas quanto ao grau de consistência
Tabela 3.3 - Classificação das rochas quanto ao grau de fraturamento48
Tabela 3.4 - Definição das classes de maciços rochosos a partir do valor de RMR51
Tabela 4.1 - Características das cavas 1, 2 e 3 da Mina de Manganês do Azul 58
Tabela 4.3 - Descrição das unidades da Formação Águas Claras79
Tabela 4.4 - Atitudes (Mergulho/Direção) das famílias de fraturas mapeadas81
Tabela 4.2 - Descrição das unidades da Formação Laterítica82
Tabela 4.4 - Análise Cinemática a nível de bancada para o flanco norte da Mina 186
Tabela 4.5 - Análise Cinemática a nível de bancada para o flanco sul o da Mina 187
Tabela 6.1 - Parâmetros dos pares interferométricos (DInSAR simples)107
Tabela 6.2 - Parâmetros estatísticos da coerência interferométrica108
Tabela 6.3 - Imagens selecionadas para o processamento do período seco 117
Tabela 6.4 - Imagens selecionadas para o processamento do período chuvoso 121
Tabela 6.5 - Parâmetros dos pares interferométricos para o período seco
Tabela 6.6 - Parâmetros dos pares interferométricos para o período chuvoso 128
Tabela 8.1: Densidade de PS para o período seco
Tabela 8.2: Densidade de PS para o período chuvoso
Tabela 8.3a - Características dos PS Flanco Norte (Período Seco)147
Tabela 8.3b - Características dos PS Flanco Sul (Período Seco)
Tabela 8.4a - Características dos PS Flanco Norte (Período Chuva)147
Tabela 8.4b - Características dos PS Flanco Sul (Período Chuva)



LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

DLR German Aerospace Center

DNPM Departamento Nacional de Produção Mineral

DInSAR Differential SAR Interferometry

DInSAR TS Differential SAR Interferometry Time-Series

DOCEGEO Rio Doce Geologia e Mineração

IBRAM Instituto Brasileiro de Mineração

InSAR SAR Interferometry

IPTA Interferometric Point Target Analysis

LoS Line-of-sight

MDE Modelo Digital de Elevação

PMC Província Mineral de Carajás

PS Persistent Scatterers

RADAR Radio Detection and Ranging

SAR Synthetic Aperture Radar

SBAS Small Baseline Subsets

SLC Single Look Complex

SSR Slope Stability Radar

UTM Universal Transverse Mercator

SLAR Side-looking Airborne Radar

PSInSAR[™] Permanent Scatterer Interferometry

RADAR Radio Detection and Ranging

ESA European Space Agency

ERS Earth Resources Satellite

TSX-1 Satélite TerraSAR-X



LISTA DE SÍMBOLOS

E₀ Amplitude do vetor campo elétrico

t Tempo

H Altura da plataformaF Frequência do sinal

Φ Fase

 $\Delta\Phi$ Diferença de fase

Λ Comprimento de onda

 $\pm_{\lambda o \chi}$ Ângulo de incidência local

α_i Declividade média do terreno

 θ_{ι} Ângulo de incidência

R Distância da fonte emissora

B_^ Linha de base normal

R_{def} Deslocamento da superfície

C Complexo conjugado



SUMÁRIO

		<u>Pág</u> .
1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	4
1.2	Objetivos	5
1.3	Estrutura do documento	5
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1	O sistema de Imageamento por Radar de Abertura Sintética (SAR)7
2.2	Geometria de Imageamento	10
2.3	Modos de Operação SAR	11
2.4	Direção ou Azimute de Visada	12
2.5	Imagem SAR	12
2.6	TerraSAR-X (TSX-1)	15
2.7	Princípios da Interferometria SAR	16
2.8	Geometria InSAR	18
2.9	Fase Interferométrica	18
2.10	Coerência Interferométrica	20
2.11	Desdobramento de fase	21
2.12	Efeito "Terra Plana"	22
2.13	Erros de desdobramento de fase	23
2.14	Interferometria SAR Diferencial (DInSAR)	25
2.15	Geometria DInSAR	27
2.16	Limitações da Técnica DInSAR	28
2.17	Aplicações da Tecnologia DInSAR no Monitoramento de Minas Aberto	
2.18	Interferometria SAR Diferencial Avançada (A-DInSAR)	30
2.19	DInSAR TS	30
2.20	Interferometria por espalhadores persistentes (PSI)	32
2.21	Aplicação da tecnologia PSI em minas a céu aberto	36

2.22	Comparação entre as diferentes técnicas interferométricas	. 38
3	ESTABILIDADE DE TALUDES DE MINERAÇÃO	. 41
3.1	Definição Taludes de Mineração	. 41
3.2	Estado de Tensões	. 42
3.3	Litologia	. 43
3.4	Grau de Alteração	. 44
3.5	Grau de Consistência	. 45
3.6	Grau de Fraturamento	. 47
3.7	Água	. 48
3.8	Classe Geomecânica	. 49
3.9	Identificação dos tipos de ruptura de taludes em rocha	. 51
3.11	Pilhas de Estéril	. 56
4	A MINA DO MANGANÊS DO AZUL	. 57
4.1.	Introdução	. 57
4.2	Aspectos Climáticos e Pluviométricos	. 58
4.3	Aspectos Fisiográficos	. 59
4.4	Província Mineral de Carajás	. 60
4.4.2	Modelos evolutivos tectônicos	. 65
4.4.3	Gênese e Geologia da Formação Águas Claras	. 67
4.4.4	Geologia Estrutural da Formação Águas Claras	. 68
4.4.5	Geologia da Mina do Manganês do Azul e Gênese do Minério Manganês	
4.4.6	Geologia Estrutural da Mina do Azul	.72
4.4.7	Hidrogeologia da Mina do Manganês do Azul	. 74
4.5.	Geologia Local	. 75
4.6	Aspectos Geomecânicos	. 83
4.7	Identificação dos tipos de ruptura de taludes em rocha	. 85
4.8	Plano de lavra	. 88
5	MATERIAIS E MÉTODOS	. 91

5.1	Materiais	91
5.2	Método	93
5.2.1	Trabalho de Campo	93
5.2.2	Processamento Interferométrico	94
5.2.2.1	Abordagem DInSAR simples	94
5.2.2.2	Abordagem DInSAR-TS	97
5.2.2.3	Abordagem PSI	100
5.2.3	Banco de Dados	105
5.2.4	Análise de Resultados	105
6	RESULTADOS	107
6.1	Processamento DInSAR	107
6.2	DInSAR Avançada	115
6.2.1	Processamento DInSAR TS	116
6.2.1.1	Período Seco	116
6.2.1.2	Período Chuvoso	120
6.2.2	Processamento PSI	124
6.2.2.1	Período Seco	124
6.2.2.2	Período Chuvoso	127
7	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS COM DADOS DE SSR	131
8	DISCUSSÕES	137
9	CONCLUSÕES	149
REFERÊNC	IAS BIBLIOGRÁFICAS	143



1 INTRODUÇÃO

A produção mineral ocupa uma posição de destaque na economia brasileira. Em 2013 constituiu 16% do Produto Interno Bruto (PIB), uma soma de US\$ 22,5 bilhões (DNPM, 2014). Atualmente, um dos principais minérios exportados é o manganês. O Brasil é o maior produtor na América Latina e o quarto no mundo. De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2014), o país possui 10% das reservas mundiais, com produção de aproximadamente 57 milhões de toneladas ao ano, que correspondeu a 18% da produção mundial no período de 2013. As principais lavras em operação estão em Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Pará. Nesse último, destaca-se a Mina do Manganês do Azul. Com direitos de exploração da mineradora Vale S.A., o complexo é responsável por 80% da produção total da empresa, que é considerada a maior produtora do minério no Brasil.

A Mina do Manganês do Azul está inserida na sequência sedimentar com cobertura laterítica da Formação Águas Claras e ao longo da respectiva sequência laterítica na Província Mineral de Carajás (PMC) (COSTA et al., 2005). Estruturalmente, localiza-se no interior do feixe da Falha Carajás, no contexto do Sistema Transcorrente Carajás. O depósito, orientado na direção E-W, abrange uma área de aproximadamente 5 km² (DARDENNE; SCHOBBENHAUS, 2003). A Mina do Manganês do Azul é constituída por três cavas ativas denominadas localmente de Minas 1, 2 e 3, com profundidades de até 80 m, bancadas com altura de 4 m e 8 m e taludes de bancada com ângulos de 30° a 60° (VALE, 2012).

Na região amazônica, taludes altos e íngremes escavados em solos saprolíticos e rochas de baixa qualidade geomêcanica (intensa alteração hidrotermal e intempérica), submetidos às altas taxas pluviométricas, estão inevitavelmente sujeitos à instabilidades. Na Mina do Manganês do Azul, estudos anteriores têm apontado como os principais condicionantes da instabilidade dos taludes a presença de estruturas geológicas (falhas, fraturas e cisalhamentos) associadas às baixas propriedades geomecânicas dos litotipos que sustentam essas bancadas, além da

surgência do nível freático. Nesse sentido, é fundamental o monitoramento da estabilidade de taludes uma vez que um eventual colapso pode ocasionar em comprometimentos para as atividades de produção e de segurança de pessoal e equipamentos. Para o monitoramento, a Vale S.A. utiliza instrumentos geotécnicos como inclinômetros, extensômetros e radares de campo (*Slope Stability Radar-SSR*). Esses equipamentos fornecem medidas da deformação com elevada resolução temporal e altíssima precisão (sub-milimétrica a centimétrica). Porém, com exceção do SSR, fornecem medidas da deformação em pontos discretos (VAZIRI et al., 2010). Nesse caso, os custos e o tempo de medições para a cobertura de grandes áreas tendem a não ser economicamente viáveis (DEHLS, 2006).

Nos últimos anos, dados orbitais sistemáticos de Radar de Abertura Sintética (SAR) têm sido utilizados no monitoramento e na detecção de deformações superficias em minas através de técnicas interferométricas (InSAR) (JUNG et al., 2007; PERSKI et al., 2009; NG et al., 2010; YANG et al., 2010; NG et al., 2012; HARTWIG et al., 2013; MURA et al., 2014; PINTO et al., 2014; PARADELLA et al., 2015). A interferometria é uma técnica de sensoriamento remoto que explora a informação da diferença de fase ($\Delta\Phi$) entre duas ondas transmitidas pelo SAR orbital em tempos distintos (t_1 e t_2) e foi empregada, inicialmente, na obtenção de modelos digitais de elevação da superfície.

A evolução tecnológica da interferometria com dados orbitais de radar (SAR) ampliou o seu uso para fins de detecção de deslocamentos na superfície. Duas abordagens têm sido utilizadas: a Interferometria Diferencial Simples (DInSAR Simples) e a Interferometria SAR Diferencial Avançada (DInSAR Avançada). Gabriel et al. (1989) utilizaram a tecnologia DInSAR simples pela primeira vez para a determinação de deslocamentos superficiais. A técnica é baseada em um interferograma diferencial derivado de um par de imagens SAR. Observou-se que a precisão dos resultados obtidos era severamente afetada pela atmosfera e pela descorrelação temporal e geométrica (FERRETTI et al., 2000). Estas limitações levaram ao desenvolvimento da segunda geração da

tecnologia, a A-DInSAR (Advanced DInSAR), particularmente pelas abordagens DInSAR Time-Series (DInSAR TS) e Interferometria por espalhadores persistentes (PSI - Persistent Scatterers InSAR) (FERRETTI et al., 2000; FERRETTI et al., 2001). A primeira gera mapas de deformação através do empilhamento (stack) de interferogramas diferenciais formados a partir de um dado intervalo de tempo (Δt) segundo as regras de menor intervalo de tempo entre as aquisições ou de subconjunto de linha de base curtas (SBAS – BERARDINO et al., 2002). O objetivo nessa abordagem é minimizar os efeitos negativos da descorrelação temporal. A segunda, por sua vez, é baseada na análise temporal de um conjunto de imagens SAR (mínimo 15), onde inicialmente selecionam-se pontos com espalhadores persistentes - PS (Persistent Scatterers) no tempo (FERRETTI el al., 2000). Através de cálculos robustos, os efeitos atmosféricos podem ser filtrados e erros devido à descorrelação temporal e geométrica podem ser eliminados (FERRETTI et al., 2000).

A combinação de distintas abordagens interferométricas tem como objetivo detectar: (1) deformações intensas (metros por ano) por meio da técnica DInSAR clássico, (2) deformações rápidas (poucos centímetros por ano) usando a técnica DInSAR TS e (3) deformações lentas (poucos milímetros por ano) através da técnica PSI. Outro aspecto importante é que a abordagem integrada, além das diferentes escalas de deformações, visa fornecer informações de condições de estabilidade para uso operacional pela geração de produtos mais rápidos com processamento mais simples que requer apenas um par de cenas (DInSAR clássico) e produtos mais elaborados e demorados (requerem sequencias de cenas) com complexidade crescente de processamento (DInSAR TS e PSI).

Portanto, as tecnologias DInSAR e A-DInSAR abriram novas perspectivas no uso de imagens de radar orbital, fornecendo medidas qualitativas e quantitativas de deformação da superfície (PARADELLA et al., 2012). A técnica fornece medidas precisas a baixo custo de imageamento e uma visão sinóptica da deformação da área com elevada resolução espacial (TOFANI et al., 2013).

O presente trabalho está inserido no projeto intitulado "Detecção e Monitoramento de Estabilidade de Taludes e Deformações Superficiais em Mina a Céu Aberto através de Técnicas Avançadas de Interferometria Diferencial de Radar: uma Avaliação na Mina de Ferro N4 (Carajás) Utilizando Dados do Satélite TerraSAR-X" (Proc. FAPESP 2010/51267-9 da Chamada de Pesquisa n.º 01/2010 FAPEMIG/FAPESP/FAPESPA/Vale S.A.). O grupo de pesquisa do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), composto pelos Drs. Waldir Renato Paradella, José Cláudio Mura, Fabio Furlan Gama, Athos Ribeiro dos Santos e por alunos da pósgraduação em sensoriamento remoto, aborda um tema inovador, testado pelo grupo com sucesso pela primeira vez em clima tropical úmido e em ambiente de mineração ativa (HARTWIG et al., 2013).

Nesse trabalho, foram realizados os processamentos interferométricos a partir de 33 imagens do satélite TerraSAR-X (TSX-1) em modo *StripMap*, órbita ascendente, imageando em banda X e polarização HH, adquiridas entre março de 2012 e abril de 2013. Assim, é analisada a aplicabilidade das tecnologias DInSAR Tradicional e A-DInSAR (DInSAR TS e PSI) na detecção de possíveis deslocamentos nos taludes de cava e de pilhas de disposição de estéril da Mina do Manganês do Azul.

1.1 Motivação

A Interferometria SAR vem sendo empregada com êxito por diversos pesquisadores ao redor do mundo nos últimos anos na detecção e monitoramento de deslocamentos superficiais, especialmente em regiões de clima temperado. A partir de meados dos anos 90, a tecnologia começou a ser empregada no monitoramento de minas subterrâneas e porteriormente em minas a céu aberto. No entanto, em ambiente tropical, são escassas as aplicações, sendo os trabalhos do INPE os pioneiros no assunto no país (HARTWIG et al., 2013; MURA et al., 2014; PARADELLA et al., 2014; PINTO et al., 2014; PARADELLA et al., 2015). Sendo assim, o grande desafio dessa pesquisa é analisar a potencialidade da tecnologia na detecção de deslocamentos superficias em minas a céu aberto inseridas em ambiente tropical úmido.

1.2 Objetivos

O objetivo principal da pesquisa de mestrado é verificar a aplicabilidade das técnicas A-DInSAR para medidas de deformação na superfície (LoS) de estruturas mineiras da Mina do Azul através de três metodologias interferométricas (Figura 1.1).



Figura 1.1 - Metodologias adotadas.

O objetivo específico é correlacionar os resultados dos processamentos interferométricos com dados geológicos (litologias/estruturas) geomecânicos disponíveis. no contexto de analisar possíveis condicionantes dos deslocamentos interferométricos detectados nos diferentes "alvos" de interesse na atividade mineral (taludes de corte, taludes de aterro, rampas de acesso, infraestrutura geral) do complexo minerador da área.

1.3 Estrutura do documento

O presente trabalho está organizado em nove capítulos. O Capítulo 1 fornece uma breve introdução sobre o tema e a relevância da pesquisa. O Capítulo 2 contempla a fundamentação teórica, subdividida em duas partes: Sensoriamento Remoto com radar e Interferometria de radar de Abertura Sintética (InSAR). O Capítulo 3 descreve os aspectos referentes à estabilidade de taludes de mineração. O Capítulo 4 aborda aspectos sobre da área de estudo, como localização, clima, fisiografia, geologia (regional e local) e características geomecânicas da mina. O Capítulo 5 trata dos materiais e do método empregados na presente pesquisa e dos resultados parciais de análises de dados. No Capítulo 6 são apresentados os resultados principais dos processamentos interferométricos das três

metodologias adotadas. O Capítulo 7 fornece a validação dos resultados da deformação em LoS do período seco com os dados SSR. No Capítulo 8 os resultados são discutidos, com base na revisão bibliográfica, dados de campo e nas características da área de estudo. Finalmente, o Capítulo 9 apresenta as conclusões e recomendações para trabalhos futuros, seguido das referências bibliográficas adotadas nesta pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O sistema de Imageamento por Radar de Abertura Sintética (SAR)

Nos últimos anos, os Radares de Abertura Sintética (SAR) têm sido importantes ferramentas para a observação terrestre por oferecerem vantagens únicas na detecção remota. Nesse sentido, as principais vantagens são: geometria de iluminação controlada, imageamento independente de iluminação solar, operar na faixa das microondas, sensibilidade às variações da morfologia da superfície e possibilidade de uso de diferentes modos de polarização (LEWIS; HENDERSON, 1998).

O radar, acrônico de RAdio Detection And Ranging, é um sensor que transmite a intervalos regulares pulsos de microondas em direção a uma cena, registrando a parcela da radiação retroespalhada na direção da linha de visada do sensor - LoS (Line of Sight) (RANEY, 1998). A técnica SAR, proposta por Carl Willey em 1951, baseia-se no efeito Doppler. O princípio SAR envolve a simulação uma antena longa através do deslocamento de uma antena fisicamente curta ao longo da direção de voo da plataforma. Durante o tempo de deslocamento correspondente ao intervalo da abertura sintética (abertura de irradiação da antena na direção de azimute) o radar emite milhares de pulso de microondas para o solo; os ecos refletidos destes pulsos são armazenados e posteriomente processados para gerar a imagem SAR. Desse modo, sensores SAR a bordo de satélites, tais como o ENVISAT, TerraSAR-X, Cosmo SkyMed, entre outros, fornecem imagens bidimensionais de alta resolução da superfície terrestre, independente da energia solar. Os sensores SAR operam normalmente na faixa de frequências de 0,3 GHz a 30 GHz do espectro eletromagnético (λ = 1 cm a 1m) (Figura 2.1).

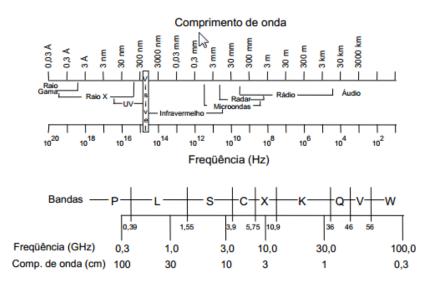


Figura 2.1 - Nomenclatura das bandas de radar. Fonte: Modificado de Dallemand et al. (1993)

A faixa espectral de microondas apresenta vantagens na detecção remota já que o pulso de onda eletromagnética penetra as nuvens, e, dependendo da faixa de frequência, solos, copa de árvores e neve (COLESANTI; WASOWSKI, 2006). A rigor, quanto menor a frequência, maior é a capacidade de penetração (por exemplo, banda L). Sendo assim, diferentemente do visível e do infravermelho, as microondas atravessam nuvens, pois são menos sensíveis à dispersão atmosférica que afeta os comprimentos de onda menores (ULABY et al., 1986) (Figura 2.2). Esta característica é interessante, sobretudo, para regiões tropicais úmidas, como a Amazônia, onde o uso de sensores ópticos é prejudicado devido à alta ocorrência de chuvas e nuvens.

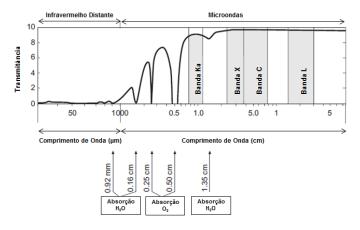


Figura 2.2 - Transmitância atmosférica para a faixa das microondas. Fonte: Adaptado de Carver et al. (1985)

Outra característica importante é que os sensores SAR operam com a energia polarizada. Basicamente, a polarização se refere à orientação do campo elétrico utilizado. As antenas de um sistema SAR podem ser configuradas para transmitir e receber a radiação eletromagnética polarizada horizontal ou verticalmente (Figura 2.3). A polarização é definida como paralela quando as energias transmitida e recebida são orientadas na mesma direção. HH indica energias transmitida e recebida horizontalmente; VV energias transmitida e recebida verticalmente. A polarização é cruzada quando as energias transmitida e recebida são polarizadas na direção ortogonal (HV, VH) (RANEY, 1998). A polarização controlada oferece vantagem, pois quando as micro-ondas incidem uma superfície e é retroespalhada, a polarização pode ser modificada, de acordo com as propriedades físicas do alvo.

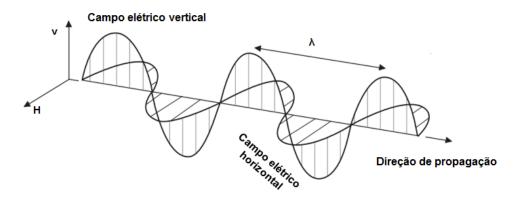


Figura 2.3 - Direções de propagação do campo elético: polarização vertical e polarização horizontal.

Dessa maneira, o SAR fornece informações de natureza única, de acordo com as propriedades elétricas e geométricas dos alvos (ROSEN et al., 2000). Em função do caráter periódico e oscilatório da radiação eletromagnética, esses sensores capturam a informação de amplitude e fase do sinal retroespalhado pelos alvos. Assim, utilizando técnicas de processamento, a intensidade e a fase do sinal retroespalhado de cada célula de resolução podem ser calculadas. Na imagem SAR, a amplitude é função da refletividade dos alvos, que depende das suas características geométricas e elétricas, enquanto a fase está relacionada a distância do alvo em relação ao sensor. Assim, a combinação das fases das imagens

adquiridas em diferentes tempos pode fornecer importantes informações geodésicas (RAUCOULES et al., 2003), sendo a informação fundamental para a interferometria SAR (GUPTA et al., 2006).

2.2 Geometria de Imageamento

Diferentemente dos sistemas de sensoriamento remoto óptico que obtém imagens próximas a posição NADIR, os sensores SAR apresentam visada lateral oblíqua (SLAR). A visada lateral é utilizada para evitar a ambiguidade do sinal de retorno retroespalhado a partir de alvos equidistantes à fonte de emissão da radiação (WOODHOUSE, 2006). A Figura 2.4 ilustra os principais elementos que configuram esse sistema de imageamento.

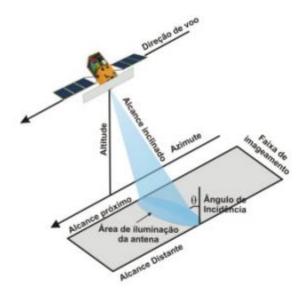


Figura 2.4 - Geometria de imageamento do sistema radar de visada lateral (SLAR).

Fonte: Adaptado de Moreira et al. (2013)

A direção em azimute é a direção horizontal paralela a direção de voo da plataforma. A direção de alcance (range) é a direção perpendicular a direção de voo da plataforma. O ângulo de incidência (θ_i) é o ângulo formado entre a radiação incidente na superfície e a normal. Este ângulo determina parcialmente o brilho de cada pixel. O alcance no terreno ($ground\ range$) é a distância sensor-alvo medida no terreno. Destaca-se que a faixa de imageamento é a distância entre o alcance próximo ($near\ range$ - extremidade da imagem mais próxima da antena do radar ou do

sinal transmitido pela antena) e o alcance distante (*far range* - extremidade da imagem mais distante do sinal transmitido pela antena). O alcance inclinado (*slant range*) é a distância real sensor-alvo. A faixa de imageamento (*swath*), por sua vez, corresponde à largura total do terreno imageado. A área coberta pelo feixe da antena na superfície do terreno é a área de iluminação da antena. Finalmente, a altitude corresponde a altura da plataforma (H).

2.3 Modos de Operação SAR

Há três modos de operação do sistema SAR: *StripMap*, *ScanSAR* e *Spotlight* (Figura 2.5).

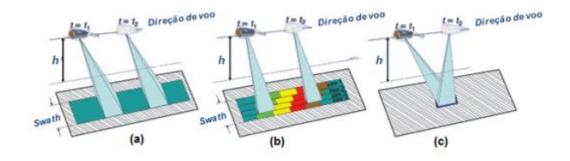


Figura 2.5 - Principais modos de operação do sistema SAR: (a) *StripMap*, (b) *ScanSAR* e (c) *Spotlight*.

Fonte: Adaptado de Moreira et al. (2013)

No modo *Stripmap*, a antena é apontada em um ângulo fixo ao longo da direção de voo da plataforma. Neste modo de imageamento, gera-se uma imagem de largura de faixa média, com boa resolução espacial. O modo *ScanSAR*, mostrado na Figura 2.5b, fornece imagens com grandes visadas em uma única passagem do satélite. Nesse modo, a antena é direcionada para produzir imagens adjacentes do terreno, geralmente imagens nesse modo possuem larga faixa de cobertura e baixa resolução. Já no modo *Spotlight* (Figura 2.5c), a antena é dirigida para iluminar uma área particular durante todo o tempo de imageamento. Nesse caso, a antena cobre uma pequena área fixa, porém com uma alta resolução.

2.4 Direção ou Azimute de Visada

A direção de visada é definida como o ângulo entre o norte geográfico e a direção de apontamento do feixe de iluminação do radar, ou seja, perpendicular à direção de movimento da plataforma (LEWIS; HENDERSON, 1998). Os sistemas SAR orbitais operam em órbitas ascendente ou descendente. No caso do imageamento TerraSAR-X, a direção de visada é próxima a 78° em relação a Linha do Equador, enquanto que para órbitas descendentes próxima à 282° (Figura 2.6).

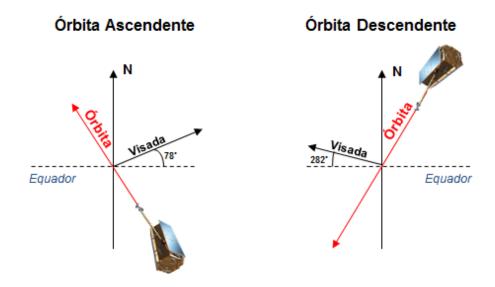


Figura 2.6 - Direções de visada do sistema SAR.

A definição da geometria de visada é essencial para a extração de informações, pois alvos com orientação perpendicular à direção de iluminação são realçados, enquanto paralelos a direção de visada podem não ser detectados para uma dada direção de visada (WOODHOUSE, 2006).

2.5 Imagem SAR

A imagem SAR corresponde a um conjunto de *pixels*, onde cada *pixel* possui a medida da amplitude e fase da radiação retroespalhada em direção a LoS (WOODHOUSE, 2006). Os dados de radar são gerados no domínio do alcance inclinado (*Slant Range*), mas normalmente são projetados sobre o plano do terreno (*Ground Range*) quando a imagem é

geocodificada. Sendo assim, a imagem SAR possui resolução em alcance e em azimute na projeção inclinada.

A resolução em alcance da imagem SAR é medida ao longo da direção de iluminação do radar e é proporcional à largura de banda do pulso emitido. Assim, quanto maior for a largura de banda do pulso, mais detalhada é a resolução espacial em alcance. Por sua vez, a resolução máxima em azimute em um sistema SAR é dada pelo comprimento físico da antena dividido por dois (LEWIS e HENDERSON, 1998).

Devido a geometria de imageamento e a natureza coerente da radiação eletromagnética, as imagens SAR apresentam características únicas que acarretam em dificuldades na extração de informações.

Um obstáculo, principalmente para aplicações de imagens de radar em estudos geológicos e geomorfológicos, é a presença de distorções geométricas provocadas pela topografia do terreno. Os principais tipos de distorções geométricas são o encurtamento de rampa (foreshortening), a inversão de relevo (layover) e a sombra. Essas ocorrem de acordo com a relação entre o ângulo de incidência local (θ_{loc}) e a declividade média do terreno (α_i) (Figura 2.7). O encurtamento de rampa ocorre quando α_i é inferior (ou igual) a θ_{loc} . A inversão de relevo se dá quando a α_i é superior a θ_{loc} . O efeito de sombra é observado quando a inclinação do terreno na direção contrária ao feixe de iluminação do sensor (rampa reversa) é igual ou superior a θ_{loc}

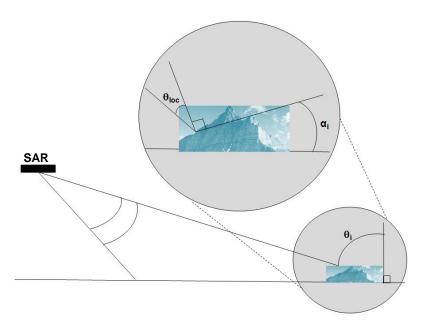


Figura 2.7 - Relação entre os ângulos de incidência (θ_i) , incidência local (θ_{loc}) e de declividade (α_i) , sendo $\theta_{loc} = \theta_i$ - α_i . Fonte: Adaptado de Raney (1998)

Além disso, as imagens SAR exibem o efeito *speckle*, um ruído típico inerente à natureza coerente da radiação. O *speckle* pode ser reduzido pela utilização de filtros ou pelo processamento *multi-look*. O processamento *multi-look* é equivalente à aplicação de um filtro que permite a passagem de baixas frequências que, além de reduzir o ruído *speckle*, reduz também informações relacionadas à textura (SHI e FUNG, 1986) (Figura 2.8). Sendo assim, apesar da redução do *spekle*, a resolução espacial da imagem SAR é degradada com o processamento. Por outro lado, a técnica *multi-look* apresenta vantagens no processamento interferométrico, pois além de reduzir o ruído *speckle*, também melhora a precisão do desdobramento de fase (GOLDSTEIN et al., 1988).

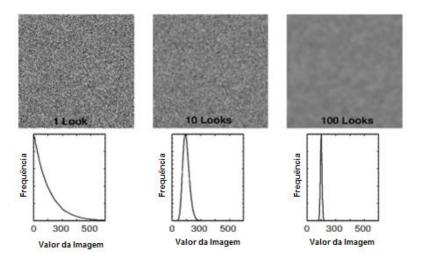


Figura 2.8 - Resultados dos processamentos 1, 10 e 100 Looks. Fonte: Modificado de Moreira (2013)

2.6 TerraSAR-X (TSX-1)

O primeiro satélite da série TerraSAR-X (TSX-1) foi lançado em 15 de junho de 2007 no Cazaquistão, com uma órbita hélio-síncrona de altitude de 514 km e tempo de revisita de 11 dias. O TSX-1 é o primeiro projeto espacial alemão desenvolvido sob Parceria Público-Privada, entre o Centro Aeroespacial Alemão (DLR) e a EADS Astrium. A acurácia 3D absoluta do TSX-1 envolve um erro médio quadrático melhor do que 10 cm, sendo a determinação precisa da órbita do satélite realizada por um receptor GPS de duas frequências e por um conjunto de refletores laser. O satélite possui um SAR, que opera na banda-X (λ=3,1 cm) e fornece imagens com elevada qualidade radiométrica e resolução espacial nominal de até 1m. Três são os modos de aquisição de imagens do TSX-1: *SpotLight*, *Stripmap* e *ScanSAR* (Figura 2.9). A Tabela 2.1 apresenta os modos de operação do satélite e as características dos produtos para cada opção.

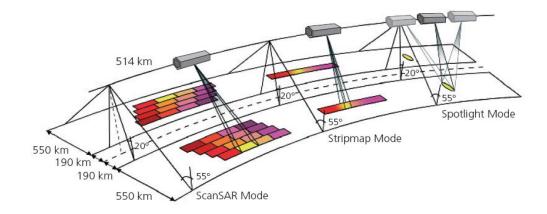


Figura 2.9 - Modos de imageamento do TSX-1.
Fonte: http://www.astrium-geo.com/en/228 terrasar-xtechnical-documents

Tabela 2.1 - Modos de operação do TerraSAR-X.

Modos	SpotLight (SL)	StripMap (SM)	ScanSAR (SC)
Ângulo de Incidência	20° - 55°	20° - 45°	20° - 45°
Opções de Polarização	HH ou VV Dual (PD): HH/VV	HH ou VV Dual (PD): HH/VV ou HH/HV ou VV/HV	HH ou VV
Resolução espacial em Azimute	2 m (PS) 4 m (PD)	3 m (PS) 6 m (PD)	16 m
Resolução espacial em alcance	1,34 m 3,21 m	3 m (PS) 6 m (PD)	16 m
Faixa imageada	10 km	30 km (PS) 10 km (PD)	100 km

Nos últimos anos, dados do sensor alemão têm sido bastante utilizados na detecção de deslocamentos superficiais, pois o curto tempo de revisita reduz a descorrelação temporal e espacial (conceitos que serão abordados a seguir) e minimiza possíveis problemas de desdobramento de fase intrínsecos ao processamento interferométrico (WEGMULLER et al., 2010).

2.7 Princípios da Interferometria SAR

A interferometria é a ciência que estuda o fenômeno resultante da interação entre ondas. Foi descrita pela primeira vez por Young, em 1803. Young demonstrou que a diferença de fase $(\Delta \phi)$ é a informação fundamental para a interferometria. A fase (ϕ) é uma grandeza física que

representa em qual estágio do ciclo a onda se encontra em um determinado instante (t), relacionando-se com a distância da fonte emissora $r_{(t)}$ (Equação 2.1):

$$\Phi = \frac{2\pi \, r_{(t)}}{\lambda} \tag{2.1}$$

Onde λ é o comprimento de onda e a fase, por se tratar de uma medida angular, varia de 0 a 360° (ou 0 a 2π) (Figura 2.10):

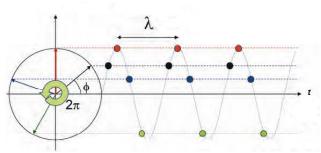


Figura 2.10 - A fase (φ) é o ângulo (posição angular) que o vetor faz com o eixo horizontal.

Fonte: Adaptado de ESA (2007).

Para um alvo situado a uma distancia r em relação ao SAR, a fase do sinal de retorno é dado pela Equação 2.2, sendo o termo de 4π relacionado a distância R de ida e retorno do sinal:

$$\Phi = \frac{4\pi \, r_{(t)}}{\lambda} \tag{2.2}$$

Partindo desse princípio, a Interferometria de Radar de Abertura Sintética (InSAR) explora a diferença de fase entre pixels análogos resultante da sobreposição de duas ou mais imagens SAR adquiridas em épocas e/ou posições ligeiramente distintas para obter medidas de deformação do terreno (GABRIEL et al., 1989; ZEBKER et al., 1994). A técnica InSAR, proposta por Graham et al. (1974), foi utilizada pela primeira vez para produzir modelos digitais de elevação (MDE). Nesse sentido, a geração de MDEs altamente precisos a partir da informação da diferença de fase entre duas imagens, obtidas independentemente das condições climáticas, significou um grande avanço para a comunidade científica. Detalhes sobre InSAR e DInSAR podem ser vistos em Paradella et al. (2012).

2.8 Geometria InSAR

A interferometria de imagens SAR pode ser gerada a partir de duas maneiras: passagem única (*Single-pass interferometry*) e passagem repetida (*Repeat-pass interferometry*) do sensor (HANSSEN, 2001). No primeiro caso, o sistema SAR possui duas antenas acopladas na mesma plataforma, separadas por uma distância fixa denominada de linha de base (*baseline*) (B). No segundo caso, apenas uma antena ilumina uma mesma área em diferentes épocas. A geometria básica da técnica está representada na Figura 2.11.

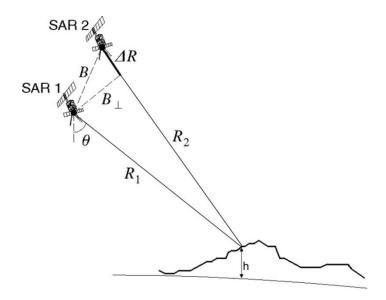


Figura 2.11 - Geometria do imageamento InSAR. As duas antenas (SAR₁ e SAR₂) estão separadas a uma distância B denominada linha de base, R₁ e R₂ correspondem à distância em alcance e h a altitude do terreno com relação a uma superfície de referência.

2.9 Fase Interferométrica

De acordo com geometria de aquisição da Figura 2.12, a diferença de fase $(\Delta \phi)$ entre duas imagens complexas pode ser obtida através da Equação 2.3 (BAMLER; HARTL,1998):

$$\Delta \phi = \frac{4\pi (R_2 - R_1)}{\lambda} = \frac{4\pi B \perp}{\lambda R_1 \operatorname{sen}\theta} h \tag{2.3}$$

Onde B_{\perp} é a linha de base normal e λ equivale ao comprimento de onda emitida pelo SAR.

A diferença de fase entre duas imagens SAR é representada pelas franjas interferométricas (*fringe*) (Figura 2.12) (MASSONNET; FEIGL, 1998). No interferograma, um franja corresponde a meio comprimento de onda ($\frac{\lambda}{2}$ = 1,55 cm para o TSX-1)



Figura 2.12 - Inteferograma da Mina do Manganês do Azul.

Entretanto, a informação da diferença de fase do interferograma da Figura 2.10 não representa apenas à superfície topográfica e o deslocamento superficial, mas também à atmosfera e aos ruídos, correspondendo ao somatório de todas essas componentes (Equação 2.4) (MOHR; MADSEN, 1999):

$$\Delta \phi = \phi_{deformação} + \phi_{topografia} + \phi_{atmosfera} + \phi_{ruidos}$$
 (2.4)

Sendo:

• $\phi_{deformaç\~ao}$ a diferença de fase provocada pelo deslocamento da superfície entre as aquisições (Equação 2.5):

$$\phi_{deformação} = \frac{4\pi}{\lambda} R_{def}$$
 (2.5)

sendo R_{def} o deslocamento do alvo em relação a LoS ocorrida entre as duas aquisições SAR.

• $\phi_{topografia}$ é a componente relativa à topografia, que depende da linha base. A informação é representada pela Equação 2.6:

$$\phi_{topografia} = 2\pi \frac{h}{h_a} \tag{2.6}$$

Onde h é a altura do alvo e h_a é a altura de ambiguidade da fase. A altura de ambiguidade (h_a) é definida como a diferença de altura que gera na fase interferométrica uma mudança de 2π (MASSONNET et al., 1993), segundo a Equação 2.7.

$$h_a = \frac{\lambda r \sin \theta}{2 B_{\perp}} \tag{2.7}$$

Sendo r a distância entre o sensor e o alvo e B_{\perp} a projeção da linha de base perpendicular na linha de visada do sensor SAR₁ (Figura 2.12).

- $\phi_{atmosfera}$ é a componente atmosférica. O atraso da fase atmosférica é devido às flutuações da composição da atmosfera entre o satélite e o alvo durante as distintas aquisições (GOLDSTEIN, 1995).
- ϕ_o corresponde a posição relativa da trajetória do satélite. Pode ser modelada e removida utilizando dados orbitais.

2.10 Coerência Interferométrica

A coerência interferométrica fornece a medida da correlação de fase entre os pixels de uma imagem de referência com uma imagem escrava, adotadas no processamento interferométrico (SABATER et al., 2011). De acordo com Hanssen (2001) a viabilidade da técnica InSAR depende da alta coerência interferométrica. A medida é definida pelo módulo do coeficiente de correlação complexo (ZHOU et al., 2009) (Equação 2.8):

$$\gamma = \left| \frac{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} C_1(i,j) C_2(i,j)^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} C_1(i,j) C_1(i,j)^*}} \right|, \qquad 0 \le |\gamma| \le 1$$
 (2.8)

onde C₁ e C₂ representam as imagens complexas de referência e escrava, respectivamente. C(i,j) o valor complexo do pixel (i,j), onde i representa a direção em range e j a direção em azimute. C(i,j)* é o complexo conjugado de C(i,j). N representa o número de pixels na direção em range e M o número de pixels na direção em azimute.

Áreas escuras nas imagens são normalmente ruidosas e estão associados a regiões com baixa coerência, enquanto valores de coerência alta (áreas claras na imagem) são relacionados a regiões com baixa vegetação, tais como, solo exposto, afloramentos rochosos ou regiões desérticas (Figura 2.13).

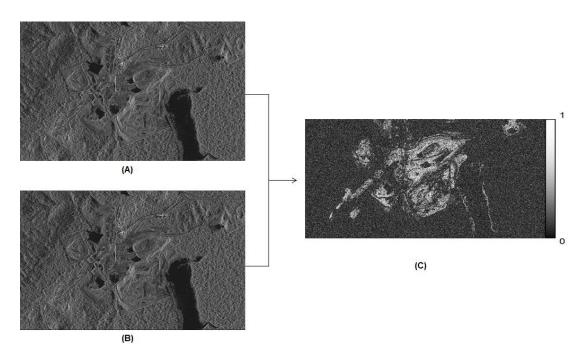


Figura 2.13 - Imagem de coerência interferométrica da Mina do Manganês do Azul (C) formada a partir da imagem de referência (A) e escrava (B). As porções escuras da imagem representam a Floresta Amazônica (baixa coerência) e as em branco a área da Mina do Manganês do Azul (alta coerência).

2.11 Desdobramento de fase

O desdobramento da fase (*phase unwrapping*) consiste na reconstrução da fase interferométrica original, sendo uma etapa crucial do processamento InSAR (ZEBKER, 1992). O interferograma complexo fornece a informação da fase relativa a 2π, não representando o número total de ciclos completos (2π n) do comprimento de onda (HANSSEN, 2001). Por isso, é necessário o desdobramento de fase, que corresponde ao processo de determinação da fase absoluta do interferograma complexo.

Há vários algoritmos para o desdobramento de fase. Métodos locais são mais empregados por apresentarem menores erros, sendo baseados no

Método dos Resíduos (e.g. Branch-cut, Crescimento de regiões, MCF) (HUANG et al., 1996).

O método dos resíduos baseia-se na localização de pontos de inconsistência de fase (GOLDSTEIN et al., 1988). A localização destes pontos é feita através da integração ao redor de um caminho fechado, em quatro pixels vizinhos, computando os gradientes de fase no sentido horário.

Baseado nisso, o algoritmo MCF (*Minimum Cost* Flow), proposto por Constantini (1998), quantifica os resíduos globalmente pixel a pixel, minimizando-os assim no interferograma desdobrado.

De modo a otimizar o desdobramento da fase, Goldstein e Werner (1998) propuseram o algoritmo de filtragem adaptativa. O filtro adaptativo melhora significativamente a visibilidade da franja interferométrica e reduz o ruído de fase relacionado a descorrelação do sistema. O algoritmo, que corresponde a um filtro de banda variável, é um filtro passa baixa na região com alta correlação, enquanto que em regiões de baixa correlação age como filtro passa alta. Essas características são muito eficazes para melhorar o desempenho do desdobramento de fase do método dos resíduos uma vez que reduzem o número de resíduos em regiões com franjas discerníveis (alta coerência), preservando ao mesmo tempo uma elevada densidade de resíduos em regiões ruidosas (baixa coerência). Essas características excluem regiões com uma alta probabilidade de erro de desdobramento enquanto aumentam significativamente a fração da imagem desdobrada permitindo assim a recuperação da topografia ou da deformação da superfície em grandes áreas (GOLDSTEIN; WERNER, 1998).

2.12 Efeito "Terra Plana"

A fase ou o efeito Terra Plana está presente nos interferogramas formados a partir de um par de imagens SAR (HANSSEN, 2001). Esse efeito ocorre em decorrência da visada lateral desses sistemas sensores. No interferograma pode ser visualizado através de franjas

interferométricas resultantes da variação linear da fase na direção em alcance. Para órbitas paralelas, estas variações aparecem no interferograma como franjas dispostas paralelamente a direção de deslocamento da plataforma. Essa variação de fase devido ao efeito Terra Plana pode ser removida analiticamente, a partir de informações precisas das órbitas.

2.13 Erros de desdobramento de fase

De acordo com Zebker (1992), erros no desdobramento de fase são um obstáculo na análise do interferograma. Os erros são causados principalmente pela imprecisão do registro, presença do ruído *speckle* e descorrelação de natureza termal, geométrica e temporal (HUANG, 1996).

Primeiramente, erros provenientes do registro impreciso das cenas interferem no padrão das franjas do interferograma, alterando-as ou até mesmo removendo-as completamente (HUANG, 1996). O interferograma gerado a partir de um registro incorreto torna-se mais ruidoso. Entretanto, este ruído não pode ser removido através da filtragem. Assim, o corregistro preciso das imagens é um passo crucial no processamento interferométrico.

Como mencionado anteriormente, o ruído *Speckle*, considerado como um ruído multiplicativo, é inerente a natureza coerente de uma imagem SAR. Esse ruido reduz a precisão do desdobramento de fase e pode aparecer como erros no interferograma.

A descorrelação também é um importante problema a ser analisado durante o processamento interferométrico, pois reduz drasticamente a qualidade dos interferogramas (WERNER et al., 2003). A descorrelação afeta a coerência entre as imagens SAR e é dividida em três tipos (HANSSEN, 2001; WERNER et al., 2003):

 Descorrelação termal (γ_{termal}) é causada pelas características do sistema, incluindo o ganho da antena e as suas características físicas. O coeficiente de correlação entre as imagens, supondo que a relação Sinal/Ruído (SNR) seja a mesma para as duas imagens é dado pela Equação 2.9:

$$\gamma_{term} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}} \tag{2.9}$$

 Descorrelação geométrica (γ_{geométrica}) relaciona-se à diferença da distância ou à separação espacial entre as duas antenas (linha de base). No entanto, quando esta distância alcança certo limiar, denominado de linha de base crítica, nenhuma informação de fase é preservada (GOLDSTEIN et al. 1988) (Equação 2.10):

$$B_c = \frac{\lambda R}{2R_r \cos \theta} \tag{2.10}$$

Onde R equivale à distância em alcance, R_r à resolução em alcance, θ ao ângulo de incidência e λ ao comprimento de onda. Para o TSX-1 o valor de linha de base crítica equivale a aproximadamente 4.000 m.

Descorrelação temporal (γ_{temporal}) resulta das mudanças físicas do terreno que acarretam em alterações das características de retroespalhamento da superfície. A análise da descorrelação temporal é fundamental, pois é um importante fator de decréscimo de correlação entre as imagens utilizadas na geração do interferograma. Destaca-se que a descorrelação temporal ocorre em sistemas de duas passagens, devido às mudanças físicas na superfície imageada no intervalo de tempo entre as aquisições.

Os termos de descorrelação listados acima são multiplicativos e resultam na descorrelação total ou coerência, conforme expressa a Equação 2.11 (WERNER et al., 2003):

$$\gamma = \gamma_{termal} \times \gamma_{geom\acute{e}trica} \times \gamma_{temporal}$$
 (2.11)

Dentre todos os fatores, a maior limitação na aplicação da técnica InSAR, é a descorrelação temporal (ROTT e NAGLER, 2006). Em áreas densamente vegetadas, como florestas e áreas de agricultura, o sinal descorrelaciona normalmente em alguns dias. Por outro lado, o sinal de retroespalhamento em áreas com pouca vegetação ou superfícies

desérticas pode permanecer coerente durante várias aquisições ao longo do tempo (ROTT et al., 2004).

2.14 Interferometria SAR Diferencial (DInSAR)

A Interferometria SAR Diferencial é uma técnica de sensoriamento remoto que associa a diferença de fase entre duas imagens SAR a uma deformação superficial ao longo da linha de visada do sensor (SANSOSTI et al., 2014). A técnica mede deformações superficiais com acurácia centimétrica e com grande capacidade de cobertura espacial (GABRIEL et al., 1989). Gabriel et al. (1989) empregaram-na pela primeira vez na detecção de deslocamentos superficiais. A técnica DInSAR tornou-se mais popular a partir do início dos anos 90, com os experimentos de Goldstein et al. (1993) e Massonnet et al. (1993).

O deslocamento do terreno entre as aquisições das imagens SAR pode ser medido através da diferença de fase relativa, independente da linha base relativa, segundo a Equação 2.12 (Figura 2.14).

$$\Phi = \frac{4\pi \, \mathrm{d}}{\lambda} \tag{2.12}$$

onde d corresponde ao deslocamento na direção de visada do sensor.

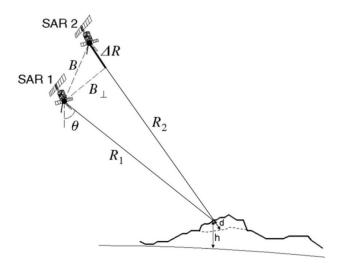


Figura 2.14 - Geometria da interferometria SAR diferencial ilustrando uma deformação do terreno (d) ocorrida entre a primeira e a segunda aquisição das imagens. Sendo h a altitude do terreno e do deslocamento provocado por uma deformação do terreno.

A técnica DInSAR simples tem como objetivo medir deformações em superfície utilizando apenas um par de imagens SAR, adquiridas em diferentes épocas e posição do satélite. O interferograma gerado a partir destas duas imagens tem componentes de fase devido às contribuições da topografia, deformações, atmosfera e ruídos. Conhecendo-se as posições das órbitas do satélite e a topografia da superfície, é possível subtrair a componente da fase topográfica do interferograma para medir deformações. Realizando este procedimento, a fase restante no interferograma diferencial é devida as contribuições do deslocamento do solo entre as aquisições, juntamente com outras componentes de fase indesejáveis, representada pela Equação 2.13:

$$\phi_{\Delta t} = \phi_{def} + \phi_h + \phi_{atm} + \phi_{\beta} + \phi_n \tag{2.13}$$

onde ϕ_{def} é a fase devido ao deslocamento do pixel em LOS, causada pela deformação no solo, ϕ_h é a fase topográfica, ϕ_{atm} é o atraso de fase atmosférica, ϕ_{β} é a fase residual devido aos erros de orbita e ϕ_{η} é o ruído de fase.

A utilização da técnica DInSAR simples para monitorar deformações do terreno é adequada quando ϕ_{def} excede as outras quatro componentes de fase representadas na Equação 2.13, por este motivo, a utilização de um MDE preciso é desejável para compensar parte do erro da fase topográfica. Em áres de mineração, devido a topografia complexa da superfície (escavações profundas, pilhas de resíduos elevadas, etc), é necessário utilizar um modelo de elevação de alta resolução a fim de diminuir o erro da fase topográfica na análise DInSAR. Uma filtragem espacial reduz o ruído de fase, no entanto, o atraso da fase atmosférica e a fase residual devido a erros de órbita não podem ser filtrados ou estimados, respectivamente. Apesar destes inconvenientes, esta técnica tem sido ainda aplicada para a detecção de deslocamentos superficiais em minas a céu aberto.

2.15 Geometria DInSAR

Segundo Hanssen (2001) há três tipos de inferferogramas diferenciais: DInSAR de duas passagens (2-pass interferometry) (MASSONNET et al., 1993), DInSAR de três passagens (3-pass interferometry) (ZEBCKER et al., 1994, GABRIEL et al., 1989) e DInSAR de quatro passagens (4-pass interferometry). O interferograma complexo formado a partir de um par de imagens possui contribuição de fase da topografia e da deformação. Nesse caso é necessário isolar a componente de fase devido a deformação das demais componentes.

No DInSAR de duas passagens, a componente topográfica pode ser removida simulando a fase a partir de um MDE externo (Figura 2.16) ou calculando-a analiticamente a partir de um par interferométrico (MASSONET et al., 1993). Embora a descorrelação temporal seja alta nesse caso, o valor da linha de base pode ser adequado às características da superfície, o que minimiza a descorrelação geométrica (KLEES; MASSONNET, 1999). Destaca-se que a confiabilidade do interferograma diferencial depende da qualidade e precisão do MDE (NG et al., 2010). Essa técnica foi utilizada pela primeira vez por Massonnet et al. (1993) para medir as deformações do terreno, a partir de imagens do ERS-1, causadas pelo terremoto Landers, no dia 28 de junho de 1992, na Califórnia (Figura 2.15).

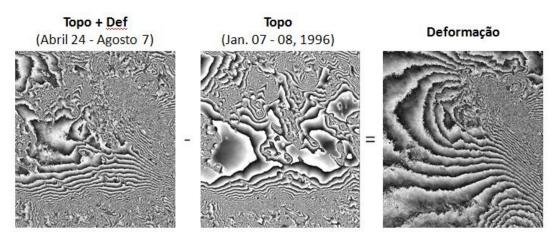


Figura 2.15 - Ilustração das fases no processamento DInSAR de duas passagens.

Fonte: Adaptado Massonnet et al. (1993)

No DInSAR de três passagens, são combinadas três imagens SAR para a formação de dois interferogramas. No primeiro par interferométrico considera-se a informação de fase relativa à deformação e à topografia, enquanto o outro apenas informação da componente topográfica. Neste último, considera-se que não há deformação e a coerência é alta. Assim, a subtração do interferograma complexo em relação ao par topográfico fornece o interferograma diferencial.

Por fim, o DInSAR de quatro passagens segue o mesmo princípio do caso anterior, porém os dois pares interferométricos são independentes, sendo formados a partir de imagens SAR distintas.

2.16 Limitações da Técnica DInSAR

Os interferogramas diferenciais fornecem a medida da deformação da superficie em escala centimétrica na linha de visada do sensor (LoS). Para obter mapas de velocidade de deformação, Strozzi et al. (2000) aplicaram a técnica de empilhamento de interferogramas diferenciais (DInSAR *Stacking*). Assim, foi possível detectar através de interfogramas diferenciais formados a partir de imagens do sensor ERS a deformação acumulada em diferentes períodos (1 mês a 5 anos) em diferentes áreas do México, Itália e Alemanha.

A abordagem DInSAR é muito sensível à perda de coerência e à distorção atmosférica que afeta severamente a fase (COLESANTI; WASOWSKI, 2002). Assim, a aplicação das técnicas é viável apenas em áreas com boa coerência interferométrica, como regiões de pouca vegetação a desérticas. Além disso, os erros introduzidos na estimativa da linha base, erros do MDE e pelas componentes de ruídos, são desprezadas na técnica DInSAR, pois para a atenuação destas componentes de fase é necessária uma análise estatística de uma série temporal de imagens.

2.17 Aplicações da Tecnologia DInSAR no Monitoramento de Minas a Céu Aberto

Apesar das suas limitações, a tecnologia DInSAR vem sendo utilizada por pesquisadores ao redor do mundo na detecção e no monitoramento de deformações superficiais em minas. Os mapas de deformação obtidos pela tecnologia fornecem a visão sinóptica da deformação em LoS com precisão centimétrica. A Tabela 2.2 apresenta seis estudos de caso recentes onde a técnica DInSAR é aplicada no monitoramento de deformações superficiais em minas a céu aberto localizadas em países de clima temperado, com exceção de Mura et al. (2014) e Paradella et al. (2015).

Tabela 2.2 - Exemplos de aplicações da abordagem DInSAR em minas a céu aberto.

ubbito:				
Autor	Localização	Sensor		
Schafer et al. (2007)	Alemanha	ENVISAT e ERS-2		
Perski et al. (2009)	Polônia	ERS-1 e ERS-2		
Schafer et al. (2011)	Alemanha	ALOS, TSX-1, ENVISAT		
Tripolitsiotis et al. (2014)	Grécia	ALOS		
Mura et al. (2014)	Floresta Amazônica, Brasil	TSX-1		
Paradella et al. (2015)	Floresta Amazônica, Brasil	TSX-1		

A maior limitação da técnica nos artigos revisados é a descorrelação temporal, que acarreta em erros para o interferograma. A perda de coerência em minas a céu aberto é esperada em decorrência da intensa atividade de mineração, as altas taxas de deslocamentos superficiais e a cobertura vegetal geralmente presente no seu entorno (PARADELLA et al., 2014). Nesse aspecto, a descorrelação temporal aumenta conforme o tempo de revisita do sensor. Pares interferométricos do ALOS-PALSAR (46 dias) apresentaram maiores descorrelações que o do TerraSAR-X, por exemplo (TRIPOLITSIOTIS et al., 2014). Em síntese, pares inteferométricos dos seis estudos listados na Tabela 2.3 apresentaram erros de desdobramento de fase devido a descorrelação temporal,

principalmente Mura et al. (2014), já que a área de estudo está inserida na Floresta Amazônica, região com clima tropical úmido caracterizado por altas taxas pluviométricas. Além disso, problemas relacionados a descorrelação geométrica também ocorrereram devido ao grande comprimento da linha de base entre duas aquisições.

2.18 Interferometria SAR Diferencial Avançada (A-DInSAR)

A técnica DInSAR Times Series (DInSAR TS) e a Interferometria por Espalhadores Persistentes (PSI) fazem parte da segunda geração da Interferometria Orbital, denominada como DInSAR Avançada. Através de cálculos robustos, ambas minimizam as limitações causadas pela atmosfera e descorrelações que afetam severamente a tecnologia DInSAR Simples (COLESANTI et al., 2003). Nos tópicos a seguir serão descritas as suas principais características.

2.19 DInSAR TS

Algoritmos para análise de séries temporais DInSAR foram desenvolvidos para melhor atender as limitações da técnica DInSAR simples, utilizando um número redundante de interferogramas diferenciais. Considere-se um conjunto de M interferogramas diferenciais gerados a partir de um conjunto de N+1 imagens SAR, adquiridas em ordem temporal (t₀, t₁,..., t_N), onde cada par interferométrico diferencial é construído em um dado intervalo de tempo (Δt) segundo as regras de menor intervalo de tempo entre as aquisições ou de subconjunto de linha de base curtas (SBAS – BERARDINO et al., 2002). Tomando um ponto como referência, localizado em uma área estável, e um ponto genérico selecionado, os valores da fase (interferogramas) desdobradas observados neste ponto em relação ao ponto de referência, pode ser organizado em um vetor de M elementos, segundo a Equação 2.14:

$$\phi_{Oh}^{T} = [\phi_{\Lambda 1}, \phi_{\Lambda 2}, ..., \phi_{\Lambda M}]$$
 (2.14)

Sendo N o número de valores de fase desconhecidos, relacionados com o intervalo de deslocamento do ponto selecionado na ordem temporal (t₀, t₁,

..., t_N), e considerando t₀ como a referência temporal (deformação zero), o vetor deslocamento pode ser representado pela Equação 2.15:

$$\phi_{disp}^{T} = [\phi_{\Lambda r1}(t_1), \phi_{\Lambda r2}(t_2), ..., \phi_{\Lambda rN}(t_N)]$$
 (2.15)

A relação entre o deslocamento (2.15) e os dados observados (2.14) pode ser representada como um sistema de M equações de N variáveis desconhecidas, na seguinte forma matricial (Equação 2.16):

$$A \phi_{disp} = \phi_{Ob} \tag{2.16}$$

em que A é uma matriz de dimenção N x M de operadores de adição, subtração e ausência (1, -1, 0) entre os pares interferométricos. A solução do sistema de equações (2.16) pode ser obtida, no sentido de Mínimos Quadrados (LS) (USAI, 2002), pela Equação 2.17:

$$\phi_{disp} = A^+ \phi_{Ob} \tag{2.17}$$

onde $A^+ = (A^T A)^{-1} A^T \acute{e}$ a pseudoinversa de A.

No caso de se utilizar um grande número de pares interferométricos diferenciais, para aumentar a amostragem temporal, o sistema de Equações em 2.17 torna-se mal condicionado, por consequência, o sistema terá infinitas soluções. Para solucionar este problema, essas equações podem ser invertidas mediante a aplicação do método SVD (Singular Value Decomposition) (GOLUB; LOAN, 1989). O resultado da Equação 2.17, ou seja, o deslocamento de superfície no sentido da linha de visada do radar (LoS), pode apresentar algumas descontinuidades no intervalo de tempo em estudo, que não faz sentido no estudo de deformações, uma solução mais eficaz foi obtida através da minimização da norma do vetor velocidade de deslocamento proposto por Berardino et al. (2002).

Assumindo que menos deformação pode ocorrer durante períodos curtos de tempo, pode-se aplicar restrições na aceleração do deslocamento para controlar as variações bruscas no resultado da série temporal (SCHIMIDT; BURGMANN, 2003; MURA et al., 2014), desta maneira,

minimizando os efeitos de atraso de fase devido a atmosfera durante as aquisições das imagens.

2.20 Interferometria por espalhadores persistentes (PSI)

As limitações no uso operacional das técnicas DInSAR levaram ao desenvolvimento da segunda geração da técnica de medida de deformação em superfície, a técnica PSI (*Persistent Scatterer Interferometry*). A técnica PSI foi originalmente desenvolvida no Instituto Politécnico de Milão – POLIMI, Itália, com o nome de PSInSAR, e buscou sobretudo a remoção das componentes da fase atmosférica. Esta técnica foi inicialmente formulada por Ferretti et al. (1999, 2000) e representa a mais avançada classe da técnica de interferometria diferencial. Seguindo a mesma abordagem da proposição inicial, variações têm sido apresentadas em anos recentes (FERRETTI et al., 2001; COLESANTI et al., 2003; WEGMULLER et al., 2003; HOOPER et al., 2004; CROSETTO et al., 2005; CROSETTO et al., 2008).

Cabe salientar que o termo PSInSAR tem sido usado na literatura como *Persistent Scatterer*, para diferenciar do *Permanent Scatterer* patenteado pelo POLIMI, e atualmente licenciado exclusivamente pela TRE (Tele-Rilevamento Europa T.R.E. s.r.l.), uma empresa *spin-off* do POLIMI.

A técnica PSI remete a aspectos referentes a formação da imagem SAR, onde o valor de cada pixel contém a soma coerente dos retornos dos muitos espalhadores do alvo. Caso os espalhadores apresentem movimentos entre si, em duas passagens, ocorrerá uma variação aleatória de fase no retorno, causando uma descorrelação dos sinais. Se, contudo, um pixel for dominado por um espalhador estável, com sinal de retorno maior que o dos espalhadores restantes, a variância do sinal de retorno devido ao movimento relativo dos espalhadores vizinhos será reduzida, permitindo sua detecção e sua utilização para cálculo de deformação (Figura 2.16), caso esta ocorra. Espalhadores persistentes - PS (*Permanent Scatterers*) são alvos que refletem energia em um grande intervalo de direções de tal forma que são visíveis ao SAR, apesar de

variações em órbita. Típicos espalhadores são estruturas geométricas funcionando como refletores de canto (diedros, triedros) presentes em obras e construções (telhados, lajes, etc.), estruturas verticais (postes, prédios, etc.), afloramentos de rochas, etc.

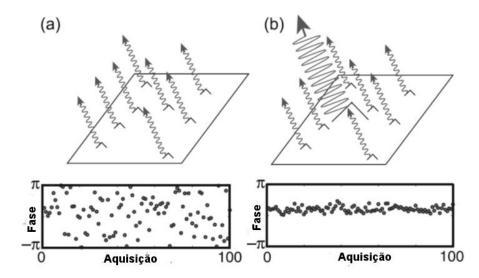


Figura 2.16 - Comportamento da fase interferométrica durante as aquisições de uma célula de resolução, (a) célula de resolução com espalhadores aleatórios e (b) célula de resolução com espalhador dominante e estável.

Fonte: Adaptado de Hooper et al. (2007).

Os PS são pouco afetados pela descorrelação e podem ser utilizados para estimar e remover a fase atmosférica (WEGMULLER et al., 2004). Segundo Colesanti et al. (2003), a componente relativa à deformação mostra alta correlação temporal e diferentes graus de correlação espacial, enquanto a atmosfera possui alta correlação espacial e baixa correlação temporal. A componente topográfica, por sua vez, apresenta comportamento linear em função da linha de base, podendo ser removida analiticamente a partir de um MDE (COLESANTI et al., 2003).

Os PS são escolhidos de acordo com o índice de dispersão das amplitudes (D_A) (FERRETTI et al., 2001) (Equação 2.13).

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \tag{2.18}$$

onde (σ_A) corresponde ao desvio padrão e (μ_A) a média dos valores de amplitude ao longo do tempo para um determinado pixel. Um pixel é

considerado como candidato inicial à PS, se $D_A < 0.25$ (HOOPER et al., 2007).

A fase de cada pixel do interferograma corresponde à soma de cinco termos ($\phi_{deformaç\~ao}$, $\phi_{topografia}$, $\phi_{atmosfera}$, ϕ_{ruidos} , ϕ_{orbita}). Portanto, para detectar apenas a deformação superficial é necessário separar estes termos. A técnica PSI compreende processos de modelagem de dados e análises interativas que associados aos tratamentos estatísticos estimam os valores dos diferentes parâmetros até isolar a componente da deformação (WERNER et al., 2003).

Várias alternativas foram desenvolvidas para obtenção da evolução temporal da deformação, tais como a metodologia PSInSAR (Permanent Scatterer Interferometry) inicialmente formulada por Ferretti et al. (1999, 2000) e a metodologia IPTA (Interferometric Point Target Analysis) formulada por Werner et al. (2003). Mais recentemente Ferretti et al. (2011) propôs um incremento na metodologia PSInSAR, considerando além dos alvos pontuais (PS – Persistent Scatterer), alguns alvos distribuídos estatisticamente homogêneos (DS – Distributed Scatterer), como representativos de alvos pontuais persistentes, passando a tratá-los como PS, processando-os de maneira semelhante a PSInSAR, mas com uma nova denominação de metodologia SqueeSAR.

A metodologia IPTA utilizada para estimar o vetor deformação (ϕ_{def}) de cada ponto PS, consiste em explorar algumas características das componentes de fase, visando a separação ou atenuação de cada uma delas. A Figura 2.17 ilustra as várias etapas do processamento utilizados na metodologia IPTA para estimar a deformação de cada PS.

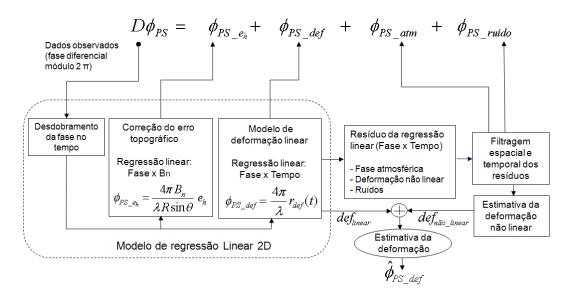


Figura 2.17 - Ilustração a modelagem de processamento da metodologia IPTA.

A abordagem IPTA é baseada em uma regressão linear bidimensional (2D) dos dados relacionados a fase diferencial de cada PS, como ilustrado na Figura 2.18. Primeiramente é realizado o desdobramento de fase no sentido temporal, em seguida, é explorada uma característica importante da fase relacionada ao erro do modelo de elevação, a sua dependência linear com a linha de base normal das várias aquisições, ou seja, Fase x Bn, segundo a Equação 2.19, para cada ponto PS:

$$\phi_{eh,i} = \frac{4\pi B_{n,i}}{\lambda R \operatorname{sen}\theta} \operatorname{eh} \cong K B_{n,i} \operatorname{eh}$$
(2.19)

onde $B_{n,i}$ corresponde a linha de base normal do i-ésimo interferograma, e_h corresponde ao erro de elevação na posição do ponto PS (constante para todos os interferogramas), R é a distância média do sensor (radar orbital) ao ponto PS e θ é o ângulo de incidência no centro da imagem. Como R e sen θ mudam muito pouco dentro de uma imagem, pode-se considerar que parte da Equação 2.19 é praticamente constante, representado por K. Como o erro de elevação e_h e K são constantes para todos os interferogramas, a Equação 2.19 representa uma equação linear de ϕ eh em relação a B_n .

A segunda regressão linear do modelo 2D é referente a deformação, que é assumida ser linear no tempo, podendo ser representada segundo a Equação (2.20):

$$\phi_{def} = \frac{4\pi}{\lambda} r_{def} \tag{2.20}$$

onde r_{def} significa a variação da distância entre o sensor (radar) ao alvo (PS), relacionado a deformação do ponto PS. Os resíduos desta regressão linear estão relacionados as componentes de fase da atmosfera, ruído e uma possível componente relacionada à deformação não linear do ponto PS.

A atenuação da fase relativa à atmosfera é realizada através de filtros que levam em conta as características desta componente de fase, de ser altamente correlacionada espacialmente na extensão da imagem (varia suavemente) e totalmente descorrelacionada temporalmente (a atmosfera muda a cada aquisição do satélite). A atenuação do ruído de fase é realizada através de uma filtragem temporal do tipo passa baixa, ou seja, passa somente as componentes de baixas frequências. Com as duas componentes de fase dos resíduos atenuada, o que resta está relacionada à componente de fase devido a deformação não linear. No final do processamento as componentes de fase linear (determinada pela regressão linear) e a não linear são adicionadas, fornecendo a componente de fase estimada pela metodologia IPTA.

No processamento IPTA, a regressão 2D pode ser realizada de modo interativo, ou seja, a medida em que se descobre a fase do erro do modelo de elevação e a fase da componente de deformação linear, estas podem ser corrigidas, resultando em uma fase interferométrica diferencial residual que pode ser novamente processada com a regressão 2D. Esta interação pode ser realizada quantas vezes forem necessárias.

2.21 Aplicação da tecnologia PSI em minas a céu aberto

Nos últimos anos, a interferometria diferencial SAR avançada (A-DInSAR) está sendo utilizada com sucesso por diversos pesquisadores na detecção e no monitoramento de deformações superficiais em minas (Tabela 2.3). Por basearem-se em uma série temporal de imagem SAR, os mapas de deformação fornecem resultados concordantes com as

medidas obtidas por instrumentação geotécnica in situ (HERRERA et al., 2010; HARTWIG et al., 2013; MURA et al., 2014; PARADELLA et al., 2015). Por não ser tão afetada pela atmosfera, a técnica A-DInSAR pode ser usada no monitoramento de deslocamentos superficiais até mesmo na Amazônia, fornecendo informações com precisão milimétrica, o que é fundamental para o planejamento da mina (MURA et al., 2014). Uma estratégia de uso integrado de diferentes técnicas com dados TSX-1 na detecção de regimes distintos de deformação em minas a céu aberto de Carajás, desde pequenas velocidades de deslocamentos (mm/ano) até deformações intensas (metros/ano), foi recentemente proposta (PARADELLA et al., 2015a). O uso complementar das informações obtidas com a técnica DINSAR com as fornecidas de medidas geotécnicas de campo mostrou-se fundamental para propósitos operacionais de monitoramento de deformações nas estruturas mineiras de ferro de Carajás (PARADELLA et al., 2015b).

Tabela 2.3 - Exemplos de aplicações da abordagem A-DInSAR em minas a céu aberto.

Autor	Localização	Sensor
Jung et al. (2007)	Coréia	JERS-1
Ng et al. (2010)	Austrália	ALOS PALSAR
Herrera et al. (2010)	Espanha	ERS, ENVISAT
Hartwig et al. (2013)	Floresta Amazônica, Brasil	TSX-1
Mura et al. (2014)	Floresta Amazônica, Brasil	TSX-1
Pinto et al. (2014)	Floresta Amazônica, Brasil	TSX-1
Paradella et al. (2015)	Floresta Amazônica, Brasil	TSX-1

Apesar da técnica fornecer medidas de deformação com precisão milimétrica, alguns autores citam certas limitações. A primeira é que o sensor não detecta movimentos abruptos e maiores que λ/4 cm (ROTT e NAGLER, 2006). Por exemplo, Herrera et al. (2010) ressaltam que utilizando sensores que operam na banda C, é possível detectar deslocamentos de no máximo 15 cm/ano. Nesse sentido, NG et al. (2010),

não detectaram uma ruptura abrupta de 3 m nos taludes da mina de carvão na Austrália.

Outra limitação é que a técnica PSI baseia-se apenas na exploração espalhadores estáveis ao longo da série temporal. Fora de áreas urbanas é muito baixa a quantidade de espalhadores persistentes, o que representa uma desvantagem para a técnica, principalmente em áreas de minas, onde a intensa atividade de mineração acarreta em perda de coerência (PARADELLA et al., 2014). Finalmente, Hartwig et al. (2013) e Paradella et al. (2015) destacam que as deformações superficiais medidas nas minas de Ferro de Carajás pela técnica são apenas ao longo da linha de visada do SAR (LoS), não sendo detectados movimentos perpendiculares a esta direção.

2.22 Comparação entre as diferentes técnicas interferométricas

As diferenças principais entre as abordagens DInSAR Simples, DInSAR TS e PSI serão descritas a seguir.

Primeiramente, as duas primeiras técnicas trabalham com dados "multi-look", ou seja, com resolução espacial reduzida, bem como apenas em áreas com boa coerência interferométrica. Já a técnica PSI, utiliza o critério da estabilidade da amplitude dos PS para a seleção do pixel (FERRETTI et al., 2000). Nesse caso, a vantagem é que os PS são constantes ao longo do tempo e consequentemente pouco afetados pela descorrelação (WEGMULLER et al., 2004).

O segundo aspecto é em relação ao número mínimo de imagens SAR. Na abordagem DInSAR Simples, é necessário apenas um par de imagens SAR. Já para as outras duas técnicas utiliza-se uma série temporal de imagens corregistradas. Essa característica é essencial para adquirir o comportamento da deformação ao longo do tempo (série temporal), o que as torna comparáveis com técnicas gedésicas tradicionais (CROSSETTO et al., 2003).

A Tabela 2.4 apresenta a síntese das principais diferenças entre as três metodologias (PARADELLA et al., 2013).

Tabela 2.4 - Principais características das técnicas interferométricas Fonte: Paradella et al. (2013)

Técnica	Principais Características		
DInSAR	 ✓ Interferometria com MDE removido ✓ Informação qualitativa ✓ É afetada por efeitos atmosféricos, erros do MDE e ruídos de fase ✓ Não fornece uma série temporal ✓ Precisão métrica 		
DInSAR TS	 Explora espalhadores permanentes (PS) Estima e remove efeitos atmosféricos Estima e remove erros do MDE Fornece uma série temporal Necessita de pelo menos 8 imagens Precisão centimétrica 		
PSI	 ✓ Explora alvos terrestres estáveis (PS) ✓ Estima efeitos atmosféricos e a sua remoção ✓ Estima e remove erros do MDE ✓ Provê uma série temporal ✓ Necessita de pelo menos 15 imagens ✓ Precisão milimétrica 		

3 ESTABILIDADE DE TALUDES DE MINERAÇÃO

3.1 Definição Taludes de Mineração

O componente principal da mina a céu aberto é o talude (BRITO, 2011). Talude é a denominação dada a qualquer superfície inclinada de solo ou rocha. Tipicamente, escavações a céu aberto possuem a configuração geométrica da Figura 3.1. No domínio da cava, é possível observar três tipos de taludes: talude global, talude de bancada e talude inter-rampa, bem como as três grandezas angulares de inclinações usadas da lavra: ângulo de talude global (da crista ao pé do talude), ângulo de face (inclinação da bancada) e ângulo inter-rampa (pé a pé da bancada).

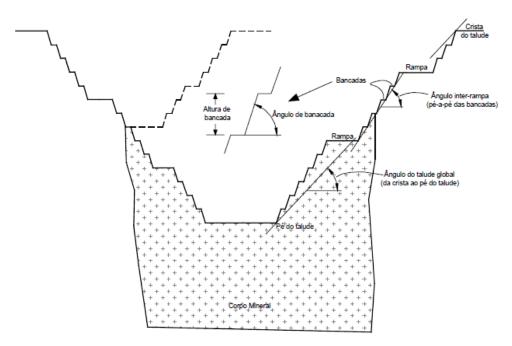


Figura 3.1 - Configuração geral de cava em mina a céu aberto Fonte: Huallanca (2004)

A configuração do talude depende da distribuição espacial do depósito mineral em conjunto com as características geomecânicas do maciço rochoso (STACEY, 2009). Em minas a céu aberto é fundamental que se apresente estável uma vez que o eventual colapso de um talude pode ocasionar perdas humanas e comprometimentos ou dificuldades operacionais das etapas de lavra. Nesse sentido, a estabilidade dos taludes depende de uma série de características, como geologia, hidrogeologia, geometria da cava e o clima. Em geologia de engenharia, o

fator mais importante é a geomecânica, expressa pela reunião dos seguintes parâmetros: litologia, grau de alteração, grau de consistência e grau de fraturamento.

3.2 Estado de Tensões

Em se tratando de qualquer obra de engenharia, quando o talude é escavado, o estado de tensão natural das rochas é perturbado. Entendese por tensão natural a tensão que ocorre nas rochas na ausência de qualquer perturbação, resultado de uma complexa interação entre as ações de esforços gravitacionais, esforços tectônicos, variação de energia térmica e processos físico-químicos (MIOTO; COELHO, 1998). Nesse caso, o maciço encontra-se estável. No entanto, a obra induz uma redistribuição de tensões nas rochas, denominadas como tensões induzidas.

Muitas obras geotécnicas, inclusive os taludes, podem ser tratadas em termos bidimensionais. Nessa análise, as tensões se reduzem a três componentes (σ_x , σ_y e X_{xy}), como ilustra a Figura 3.2, na qual apresentase também a convenção de sinais, em que são positivas as tensões normais de compressão, e tensões cisalhantes, que tendem a girar no sentido anti-horário (GERSCOVICH, 2012). Destaca-se que a componente paralela ao plano de aplicação da força é denominada tensão de cisalhamento, enquanto a perpendicular, tensão de compressão.

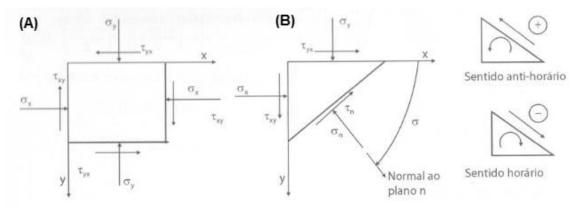


Figura 3.2 - Componentes de tensão bidimensional : (A) Equilíbrio bidimensional, (B) Plano qualquer.

Fonte: Gerscovich (2012)

Assim, a modificação das tensões se traduz em deformações de várias magnitudes que podem levar as rochas a se romper gradativamente ou de modo brusco.

Inicialmente o maciço rochoso está submetido a um certo confinamento (tensão natural). A escavação da cobertura para o talude equivale a aplicação de uma força de tração no maciço. Nesse sentido, junto à superfície de escavação, a tensão menor sofre relaxamento, podendo gerar, ou mesmo ficar negativa enquanto que a tensão maior pode sofrer uma grande concentração, aumentando substancialmente o seu valor e em alguns casos ultrapassando a própria resistência das rochas (MIOTO e COELHO, 1998). À medida que se procede a escavação verifica-se uma diminuição da resistência entre blocos rochosos. Uma vez que o relaxamento ocorra, não é possível reverter o processo. Essa dinâmica ocorre em todo talude e sempre culmina em deformações, mas não é necessariamente indicativo de instabilidades (READ; STACEY, 2009). Instabilidades são eventos maiores. como rupturas. escorregamentos, colapsos, etc. que de fato, acarretam em danos para a operação da mina a céu aberto.

Em obras de escavação de maciços rochosos para a execução de taludes, o reequilíbrio e a concentração das tensões se verificam no pé do talude. Nesse sentido, a obtenção de uma situação de equilíbrio depende da capacidade do maciço de acomodar-se às novas tensões geradas, ou seja, da sua geomecânica.

3.3 Litologia

Em mineração, é fundamental o entendimento da geologia regional e da gênese da mineralização na qual os taludes estão escavados. A caracterização da geologia permite estimar as propriedades de resistência e deformabilidade do maciço rochoso, fundamentais para a estabilidade dos taludes. Baseia-se na análise de aspectos inerentes à matriz rochosa, como sua classificação, grau de alteração e resistência, e aspectos relativos às descontinuidades, como orientação, espaçamento,

persistência, rugosidade e resistência das paredes, abertura, preenchimento e infiltrações (ISRM, 1978; SERRA JÚNIOR; OJIMA, 1998).

3.4 Grau de Alteração

O grau de alteração é o parâmetro que mede a intensidade da ação do intemperismo sobre as rochas, com base na alteração de seus minerais, mudança de coloração, etc. Em regiões de clima tropical as rochas estão sujeitas a ação constante de intemperismo químico e físico. O grau de alteração tem um grande efeito sobre as propriedades da rocha, tais como sua resistência, permeabilidade e dureza (ISRM, 1981). É fundamental a análise do tipo de alteração, que pode mudar significativamente as propriedades do material rochoso, positivamente (silicificação) ou negativamente (argilização).

Para um mesmo tipo litológico, a rocha mostra-se menos resistente e mais deformável, quanto mais avançada a alteração, o que permite reconhecer estágios ou graus de intensidade da manifestação do processo. O estado de alteração é baseado em métodos de observação. Em rochas é costume referir-se a maior ou menor facilidade com que se parte o material, utilizando um martelo de mão, ou a sua coloração e brilho como consequência da alteração de certos minerais como feldspatos e minerais ferromagnesianos. A Vale S.A. adaptou a classificação do grau de alteração de rochas da ISRM (1981) dividida em seis classes, de acordo com a Tabela 3.1.

No entanto, destaca-se que o conceito de alteração se aplica bem para rochas de origem metamórfica e magmáticas. Em rochas sedimentares, a evolução dos processos de alteração pode não resultar em diminuição de suas características mecânicas. Em rochas arenosas há grande dificuldade em se reconhecer o estado de alteração, uma vez que o fenômeno nem sempre se manifesta por modificações cromáticas da rocha, ou no brilho dos minerais. Nesse caso, recorre-se ao parâmetro da consistência (GUIDICINI et al., 1972)

Tabela 3.1 - Graus de alteração das rochas segundo o IPT.

	Grau de Alteração	Descrição			
Código		3			
W1	Rocha Sã	Nenhum sinal visível de material rochoso alterado. Minerais preservam as características originais de brilho, cor e clivagem			
W2	Rocha pouco alterada	Descoloração leve indicando alteração da rocha e das descontinuidades. Menos de 5% do maciço rochoso está alterado Perda do brilho dos minerais			
W3	Rocha moderadamente alterada	Menos da metade do material rochoso está decomposto, a rocha fresca ou descolorida está presente como uma estrutura descontínua ou em pedaços. Toda a matriz apresenta-se com evidencias de oxidação, caulinitização. Pode ocorrer material mais alterado e ou solo ao longo das descontinuidades			
W4	Rocha muito alterada	Mais da metade do material rochoso está decomposto e ou desagregado. A rocha fresca ou descolorida está presente como uma estrutura descontínua ou em pedaços. Alteração mineralógica muito acentuada. Cores bastante modificadas. Possível presença de núcleos rochosos menos alterados			
W5	Rocha completamente alterada	Todo material esta decomposto, porém com a estrutura original preservada. Saprolito (W5). Nas FFB tantos as bandas silicosas quanto às ferruginosas apresentam-se com baixa coesão (sílica liberada) e as bandas ferruginosas apresentam-se alto índice de oxidação (limonitizados).			
W6	Solo residual	Todo material rochoso foi decomposto e a estrutura original esta destruída. Solo formado por alteração "in situ". (W6). Nas FFB as bandas de sílica então liberadas com filmes de hidróxido de ferro, as bandas ferruginosas estão completamente hidratadas.			

Fonte: Vale S.A. (2012)

3.5 Grau de Consistência

O grau de consistência é um parâmetro baseado nas seguintes características: resistência ao impacto (tenacidade), resistência ao risco (dureza) e friabilidade. É caracterizada tátil-visualmente, através da apreciação da resistência que a rocha oferece ao impacto do martelo e ao risco com lâmina de aço (GUIDICINI et al., 1972). Vaz (1996), com base na resistência à escavação e à perfuração, apresenta as classes de rocha , alterada, mole e dura. O autor correlaciona tais classes de alteração à resistência à compressão e no módulo de deformabilidade.

Com base nessas classificações, a Vale S.A. propõe um sistema de classificação para o grau de consistência das rochas (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Classificação de rochas quanto ao grau de consistência.

Código	Grau de Consistência	Descrição
R0	Extremamente macia	Penetrável pelo polegar. Marcado com a unha/ Esfarela facilmente sob pressão dos dedos e dissolve completamente quando agitado em água /R ₀ (T _c 0,25 a 1 MPa)
R1	Macia	Penetrável por lâmina provoca sulcos profundos, desagregáveis manualmente / Esfarela ao golpe do martelo / R ₁ (T _c 1 a 5 MPa)
R2	Média Macia	Facilmente penetrável por lâmina; quebra-se facilmente a um golpe do martelo / Somente as bordas do fragmento podem ser quebradas pela pressão dos dedos / R ₂ (T _c 5 a 25 MPa)
R3	Média	Quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo, as bordas do fragmento não podem ser quebradas pela pressão dos dedos / A lâmina de aço provoca sulcos rasos na superfície / R ₃ (T _c 25 a 50 MPa)
R4	Média dura	lâmina de aço dificilmente provoca sulcos na superfície / Quebra-se a um golpe de martelo / R ₄ (T _c 50 a 100 MPa)
R5	Dura	Quebra-se com vários golpes de martelo / Não risca pela lamina de aço / $R_{\rm 5}$ ($T_{\rm c}$ 100 a 250 MPa)
R6	Extremamente dura	São impenetráveis por lâminas de aço / Os fragmentos possuem bordas ásperas e cortantes / Quebra-se com dificuldade a vários golpes do martelo / R ₆ (T _c >250 MPa)

Fonte: Vale S.A. (2012)

3.6 Grau de Fraturamento

O entendimento da geologia estrutural é fundamental para a análise da estabilidade de taludes. É necessário analisar as estruturas em

macroescala, no contexto regional, e microescala. Em geomecânica, o grau de fraturamento corresponde ao número de fraturas por metro ao longo de uma dada direção. São consideradas somente as estruturas primárias. O número de famílias de descontinuidades pode ser um fator importante na estabilidade de talude em rocha, dependendo de sua orientação em relação à face deste podem ser favoráveis ou não a determinadas direções de corte das bancadas. A maior densidade destas famílias associada a pouco espaçamento pode mudar o mecanismo potencial de escorregamento do talude. A Tabela 3.3 demonstra a classificação elaborada pela comissão da ISRM (1981).

Para a aplicação desse critério procede-se inicialmente um zoneamento do meio rochoso em áreas de fraturamento homogêneo.

Tabela 3.3 - Classificação das rochas quanto ao grau de fraturamento

Código	Grau de Fraturamento	Espaçamento das descontinuidades
F1	Maciço	> 2m
F2	Pouco fraturado	60 cm e 2m
F3	Moderadamente fraturado	20 e 60 cm
F4	Muito fraturado	6 e 20 cm
F5	Extremamente fraturado	2 e 6 cm
F6	Fragmentado	< 2 cm

Fonte: ISRM (1981).

3.7 Água

Outro fator que exerce influência na estabilidade de taludes de escavação, especialmente em regiões tropicais úmidas, é a água (AZEVEDO e FILHO, 1998). Tanto a pressão da água subterrânea como os aspectos do fluxo de água superficial podem ter efeitos negativos na estabilidade de taludes.

Basicamente, a água das chuvas, ao se acumular no maciço rochoso leva a uma diminuição da coesão. A mudança nas poropressões altera a tensão efetiva e, consequentemente, a resistência do solo (GERSCOVICH, 2013).

Um efeito secundário da água subterrânea é que determinados minerais, como os argilo-minerais secundários (e.g. ilita e montmorilonita) presentes nos solos reagem desfavoravelmente em água. Especialmente os solos com grandes quantidades de montmorilonita tendem a ser mais instáveis em presença de água. Apresentam em geral grande resistência quando secos, perdendo quase totalmente a sua capacidade de suporte por saturação. Sob variações de umidade apresentam grandes variações volumétricas, retraindo-se em processos de secagem e expandindo em meio aquoso.

3.8 Classe Geomecânica

As classificações geomecânicas são utilizadas para caracterizar os maciços rochosos através de um conjunto de propriedades identificadas por observação direta e ensaios realizados *in situ* ou em amostras recolhidas em sondagens. O interesse destas classificações é sistematizar o conjunto de elementos geotécnicos de um determinado maciço rochoso. Dentre as várias classificações geomecânicas, destacase a de Bieniawski (Sistema RMR)

A classificação geomecânica é baseada no princípio da atribuição de pesos aos seis parâmetros que Bieniawski considerou contribuírem mais significativamente para o comportamento dos maciços rochosos (Figura 3.3).

A DAD	ÄMETDOS DA CLASSI	FICAÇÃO E SEUS DESSOS			`		, ,
A- PARA		FICAÇÃO E SEUS PESOS					
	Parâm Resistência da rocha	indice de comp. Puntiforme	>10MPa	4-10MPa	2-4MPa	1-2MPa	Uso não recomendável
1	intacta	Resist.a comp. Uniaxial	>250MPa	100-250MPa	50-100MPa	25-50MPa	5-25MPa 1-5MPa <1MP
	IIItacta	Peso	15	12	7	4	2 1 0
		1 630	10	12	,	4	2 1 1 0
_		RQD	90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%
2		Peso	20	17	13	8	3
3	Espaçamento d	das descontinuidades	>2m	0,6-2m	200-600mm	60-200mm	<60mm
		Peso	20	15	10	8	5
4 Condição das descontinuidades (ver E)		Sup.muito rugosa, Não persistente,F echada e Paredes sem alteração.	Sup.pouco rugosa, abertura <1mm e paredes levemente alteradas	Sup.pouco rugosa, abertura <1mm e paredes muito alteradas	Sup.estriada ou preenchimen- to <5mm ou abertura de 1 5mm, persistente	Preenchimento >5mm ou abertura >5mm persistente	
		Peso	30	25	20	10	0
		Infilment don to the		4011	40.05.11	05.405.11.2	40511
	Ação da água	Infiltração 10m de túnel	nula	<10 l/min	10-25 I/min	25-125 l/min	>125 l/min
5	subterrânea	Relação u/σ ₁ *	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5
		Condições Gerais	Seco	Úmido	Molhado	Gotejando	Fluxo abundante
		Peso	15	10	7	4	0
B- AJUS	STE DOS PESOS PAR	A A ORIENTAÇÃO DAS DE	SCONTINUIDA	DES (Ver F)			
	Direção geológio	ca e mergulho	Muito favorável	Favorável	Moderado	Desfavorável	Muito desfavorável
		eis e minas	0	-2	-5	-10	-12
Peso		ındações	0	-2	-7	-15	-25
	1	Taludes	0	-5	-25	-50	•
C- CL AS	SSE DO MACICO DOC	HOSO DETERMINADA PEL	A SOMATÓRI	A DOS DESOS			
U- ULAC	Somatório de p		100-81	80-61	60-41	40-21	<21
	Classe do		1	II	III	IV	V
	Descri		Muito bom	Bom	Regular	Ruim	Muito Ruim
D- DESC	CRIÇÃO DAS CLASSE						
	Número da	a classe	I	II	III	IV	V
To	empo médio de autosu:	stentação do vão livre	10 anos p/ 15m	6 meses p/ 8m	1 semana p/ 5m	10 horas p/ 2,5m	30 minutos p/ 1m de vão livre
	Coesão do ma	aciço (Kpa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
	Ångulo de atrit		>45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	<15°
E- RECO	OMENDACOES PARA	A CLASSIFICAÇÃO DA CO	NDICAO DAS	DESCONTINUI	DADES		
E- RECOMENDAÇOES PARA A CLASSIFICAÇAO DA CONDIÇÃO DAS DESCONTINUIDADES Persistência da descontinuidade < 1m 1-3m 3-10m 10-20m >20m							
Peso		6	4	2	1	0	
Abertura		Nenhuma	<0,1mm	0,1-1mm	1-5mm	>5mm	
	Duggel	Peso	Muito rugoea	5 Pugges	Pouco rugoea	1 Suave	0 Estriadas
Rugosidade Peso		Muito rugosa 6	Rugosa 5	Pouco rugosa 3	Suave 1	0	
Preenchimento			Nenhum	Duro,<5mm	Duro,>5mm	Mole,<5mm	Mole, >5mm
Peso 6 4 2 2 0 Alteração Não alterada Pouco Moderada Altamente Decomposta							
	Altera	ção Peso	Não alterada 6	Pouco 5	Moderada 3	Altamente 1	Decomposta 0
		1-630	J	J	3		
F- EFEITO DA RELAÇÃO DA DIREÇÃO GEOLÓGICA E DO MERGULHO							
Direção geológica perpendicular ao eixo do túnel Direção geológica paralela ao eixo do túnel							
Escavação no sentido do Escavação no sentido do							Mergulho 20°-45°
mergulho. Mergulho 45°-90° Mergulho 20°-4: Muito favorável Favorável			o-				Moderado
Escavação contra mergulho. Escavação contra mergulho.			. Mergulho 20°	70			
⊏scava	Mergulho 45°-90° 45°			Mergulho 0°-20° direção geológica qualquer			
					Mergulho 0°-2	0º direção geo Moderado	lógica qualquer

Figura 3.3 - Sistema de Classificação Geomecânica RMR Fonte: Modificado de Bieniawski (1989).

O somatório dos pesos atribuídos a cada um destes parâmetros constitui um índice, usualmente designado por RMR, ao qual corresponde uma das cinco classes de qualidade de maciços, consideradas pelo autor (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 - Definição das classes de maciços rochosos a partir do valor de RMR.

Valores de RMR	Classe De Maciço	Descrição
100-81	I	Excelente
80-61	II	Muito boa
60-41	III	Boa
40-21	IV	Ruim
<20	V	Muito ruim

3.9 Identificação dos tipos de ruptura de taludes em rocha

A identificação dos tipos de ruptura de taludes de rocha é necessária para que o projeto de engenharia de um talude possa ser realizado. Quando várias famílias de descontinuidades se interceptam em ângulos oblíquos, uma análise cinemática pode ser útil na previsão do mecanismo de ruptura (HOEK; BRAY, 1981) (Figura 3.4). As rupturas envolvendo movimento de blocos ou placas de rocha a partir de superfícies de descontinuidades combinam um ou mais dos três tipos básicos: ruptura planar, ruptura em cunha e tombamento de blocos (GOODMAN, 1989).

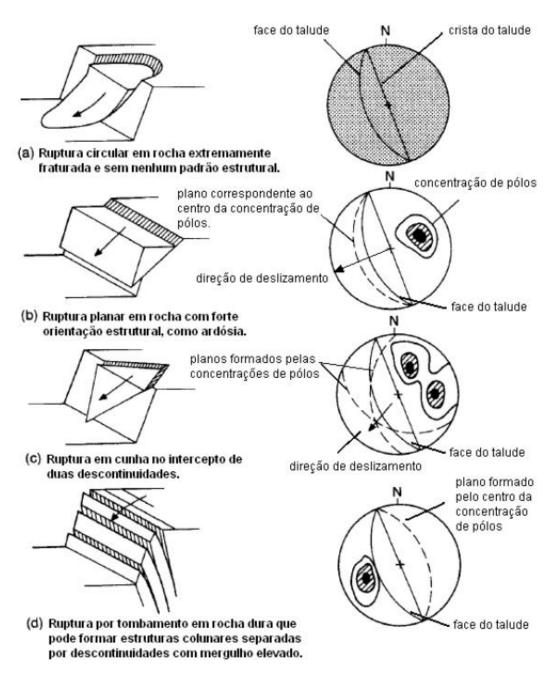


Figura 3.4 - Tipos de Instabilidade em taludes rochosos. Fonte: Hoek e Bray (1981)

Para ruptura planar, o plano de descontinuidade responsável pelo deslizamento deve ter direção paralela ou aproximadamente paralela à face do talude, com variação máxima de 20°. O plano de fratura deve aflorar na face do talude, o que significa que seu mergulho deve ser menor que o da referida face. O mergulho do plano de fratura deve ser maior que seu ângulo de atrito.

A análise de ruptura em cunha, ao contrário da ruptura planar e do tombamento, não é realizada em função da envoltória de pólos, mas da interseção entre os planos das famílias componentes do sistema de fraturamento do maciço. Uma vez determinadas as interseções, tem se a orientação do vetor de mergulho da cunha e consequentemente, a direção de deslizamento ditada pela coexistência dessas duas famílias. Percebe-se que como a direção de deslizamento é comandada pelo confinamento lateral que as próprias famílias de fraturas impõem, não há uma tolerância de paralelismo.

No caso de tombamento, quando estão presentes no maciço, feições estruturais verticais ou subverticais e de mergulho contrário a face do talude, pode haver rotação e consequente queda de blocos ou colunas segundo um ponto fixo. Conforme apresentado para rupturas planares, também é necessário um determinado paralelismo entre essas feições. Entretanto para o tombamento sugere-se uma margem de tolerância de 30°. Na análise do tombamento o mergulho da feição estrutural é contrario ao da face do talude diferentemente da analise da ruptura planar onde a feição mergulha no mesmo sentido que o talude.

3.10 Monitoramento de Taludes

No intuito de prever e minimizar os danos (materiais e econômicos) são empregadas técnicas de monitoramento geotécnico de taludes (TOFANI et al., 2013). Essas são fundamentais para a operação da mina, pois fornecem resultados precisos e com alta resolução temporal. A instrumentação geotécnica pode estar localizada em superfície e subsuperfície (VAZIRI et al., 2010) (Figura 3.5).

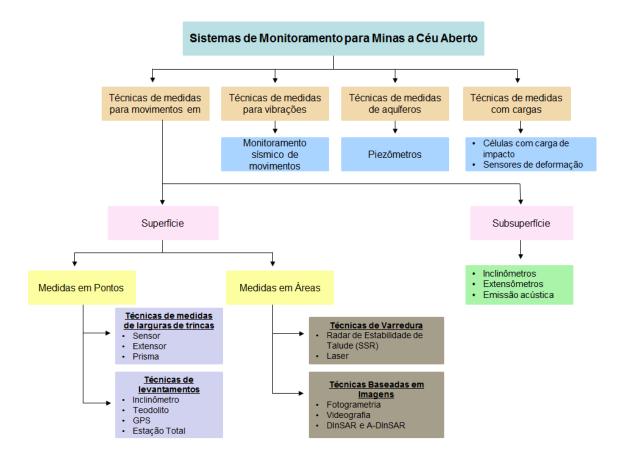


Figura 3.5 - Técnicas de um sistema de monitoramento de taludes em mina a céu aberto Fonte: Adaptado de Vaziri et al. (2010).

Nesta classificação quatro categorias de técnicas são consideradas, que dependem dos parâmetros que são monitorados: (1) medidas de movimentos na superfície, (2) medidas de vibrações no terreno, (3) medidas de aquíferos e (4) medidas de impacto de cargas. Na proposta de Vaziri et al. (2010), o monitoramento de deslocamentos na superfície é subdividido em medidas em pontos discretos (trincas e levantamentos) e medidas sobre áreas maiores (varreduras e imageamentos).

Medidas em pontos discretos por levantamentos são de uso mais amplo no monitoramento de taludes em minas a céu aberto, particularmente através do uso de estação total e rede de prismas refletores. As suas vantagens são que fornecem resultados em tempo real, de elevada resolução temporal (depende da frequência das medidas), elevada precisão (submilimétrica a centimétrica). Como desvantagens devem ser mencionadas a necessidade de visibilidade entre estação e prismas e a presença de ruídos nos dados originais. Porém a maior limitação, é a

impossibilidade de fornecer informações espaciais requeridas no monitoramento de áreas extensas. Nesta situação, os custos e o tempo de medições envolvidas tendem a não ser economicamente viáveis (DEHLS, 2006).

A necessidade de prover medidas mais precisas de deslocamentos de taludes levou ao desenvolvimento recente de sistemas de varreduras através de radares interferométricos de campo (Slope Stability Radar) para medidas de estabilidades (Figura 3.6). Nestes sistemas, a resolução espacial é função da frequência usada e da distância do sensor à face do talude a ser monitorado. Quanto mais próximo o radar da parede, menor é a dimensão da área pelo feixe de iluminação, e consequentemente menor tamanho do pixel. Os radares interferométricos de campo possibilitam medições de instabilidade em taludes em grandes distâncias (máximo de 3500 m), com elevada precisão de deslocamentos na linha de visada do sensor (0,1 - 0,2 mm), sem a necessidade de acesso à área de interesse, e operando em condições pouco afetadas por chuvas, brumas ou poeiras. Este sistema de campo tem como grande vantagem o uso automático e contínuo em monitoramento ativo, sendo considerado uma ferramenta ideal de alerta no monitoramento de riscos iminentes. No entanto, a maior limitação é que as medições são de cobertura espacial limitada, restritas à varredura de setores da mina.

Finalmente deve ser analisado o componente de monitoramento para áreas mais extensas, realizado através de imageamentos, que na proposta de Vaziri et al (2010) incluía apenas fotogrametria e videografia. Na Figura 3.5 foram incluídas as técnicas DInSAR e sua inovação (A-DInSAR).

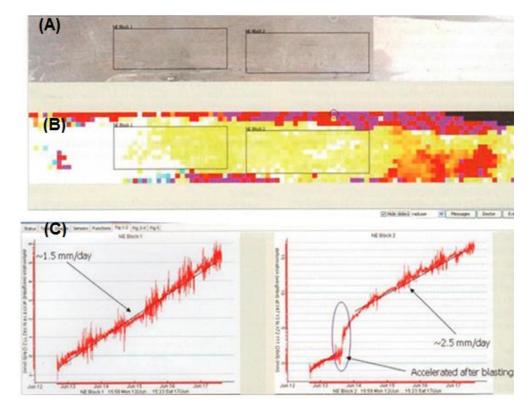


Figura 3.6 - Deformação acumulada (LoS) do SSR: (A) Fotografia digitalizada da área; (B) "Mapa de calor" da deformação da área digitalizada. (c) Perfil da deformação para as áreas selecionadas (retângulos). Fonte: Read e Stacey (2009)

3.11 Pilhas de Estéril

A estabilidade de pilhas de estéril depende de vários fatores, sendo os principais: o local de disposição do estéril, as propriedades geotécnicas da fundação, os aspectos hidrológicos e hidrogeológicos, as propriedades geotécnicas da pilha, o método de disposição, e, finalmente, as acelerações, especialmente, em regiões sísmicas.

A principal característica das pilhas de estéril são os recalques que ocorrem durante e após a operação. São devido à reorientação das partículas, alteração por intemperismo, enfraquecimento dos contatos entre partículas, e carreamento de material. A taxa de recalque depende da altura da pilha, dos carregamentos, da localização na pilha, do tipo de material e da presença de água.

4 A MINA DO MANGANÊS DO AZUL

4.1. Introdução

A Mina do Manganês do Azul está inserida na porção central da Província Mineral de Carajás (PMC), no município de Parauapebas, no Pará. A reserva foi descoberta em setembro de 1971 e desde 1985 a Vale S.A. administra as jazidas. O complexo do Azul é constituído por três cavas: a Mina 1, que corresponde a mina principal e está localizada na porção central da área, a Mina 2 a oeste e a Mina 3 a leste (Figura 4.1). As características das três cavas estão descritas na Tabela 4.1. Atualmente, existem duas pilhas de estéril: a Pilha de Estéril Norte e Pilha de Estéril Oeste, constituídas predominantemente por siltito, pelito-siltito e pisólito. Além disso, há duas barragens no entorno das minas: a do Azul e a do Kalunga.

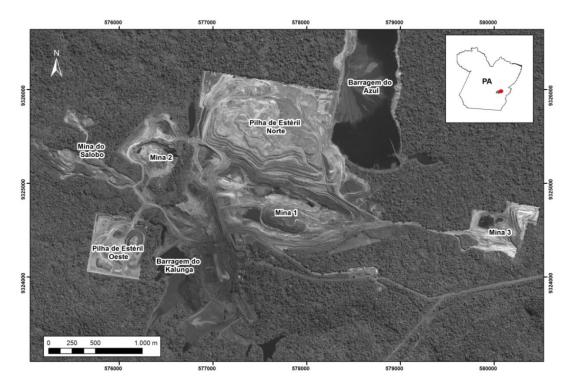


Figura 4.1 - Localização da área de estudo e configuração geral das minas 1, 2 e 3.

Tabela 4.1 - Características das cavas 1, 2 e 3 da Mina de Manganês do Azul.

Mina	Área (km²)	Profundidade (m)	H bancada (m)	L berma (m)	θ face	θ interrampa
1	2,0	80	4 - 8	6	58°	27°
2	2,0	30	4 - 8	8	60°	30°
3	0,2	30	4 - 8	8	60°	30°

H= altura; L= largura

Fonte: Vale S.A. (2012)

4.2 Aspectos Climáticos e Pluviométricos

Na região Amazônica, o clima dominante é tropical, quente e úmido, com temperatura média anual de 26°C e taxa pluviométrica média de 1600 mm/ano.

A Figura 4.2 mostra os dados mensais de pluviometria da Estação Meteorológica da Mina de Manganês do Azul no período de aquisição das imagens TSX-1 (março/2012 a abril/2013). Os dados pluviométricos indicam que nesse período o total de chuva acumulado foi de 3149,5 mm. O período de seca se estende do final de março até começo de outubro, sendo os meses de agosto e setembro praticamente secos, com taxas pluviométricas em torno de 50 mm. Por outro lado, os meses mais chuvosos foram janeiro (333 mm) e março de 2013 (288,5 mm).

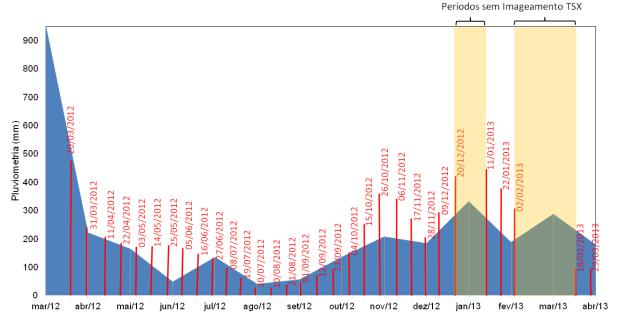


Figura 4.2 - Pluviometria mensal da Mina do Manganês do Azul para o período das imagens TSX-1. As linhas vermelhas indicam as datas de aquisição das 33 imagens.

Fonte: Vale (2013)

4.3 Aspectos Fisiográficos

As minas do Azul estão inseridas na Serra dos Carajás, entre a Serra Norte e Serra Sul. A Serra Norte apresenta altitudes que variam de 400 a 600 m, podendo alcançar 700 a 800 m. A Serra Sul está inserida no flanco sul da Serra de Carajás, possuindo aproximadamente 73 km de extensão, apresentando orientação WNW-ESE, com alturas que variam de 100 a 300 m e altitudes superiores a 900 m (COSTA, 1991). Este relevo típico de serra pode apresentar topo aplainado, angulares e até arredondado, e com vertentes côncavas-convexas mais acentuadas na base.

A área é caracterizada por expressivo intemperismo químico que formou perfis espessos de solos (latossolos), totalmente cobertos pela floresta Ombrófila Equatorial com dosséis de várias espécies e distintos níveis (PARADELLA et al., 1994).

4.4 Província Mineral de Carajás

A Província Mineral de Carajás (PMC) engloba expressivos depósitos de Fe (e.g. N4, N5), Cu (e.g. Serra Verde), Au (e.g. Serra Pelada), Mn (e.g. Azul, Buritirama), e Ni (e.g. Vermelho, Onça-Puma), sendo considerada a maior província mineral do Brasil. A PMC corresponde a um bloco arqueano (>2,5 Ga) inserido na porção sudeste do Cráton Amazônico (TASSINARI e MACAMBIRA, 2004), sendo constituída por terrenos geológicos que datam do Arqueano ao Proterozóico. A PMC é dividida em duas unidades geotectônicas principais: Domínio Rio Maria ao sul e Domínio Carajás ao norte, separadas por zonas de cisalhamento com direção preferencial E-W (VASQUEZ et al., 2008) (Figura 4.3).

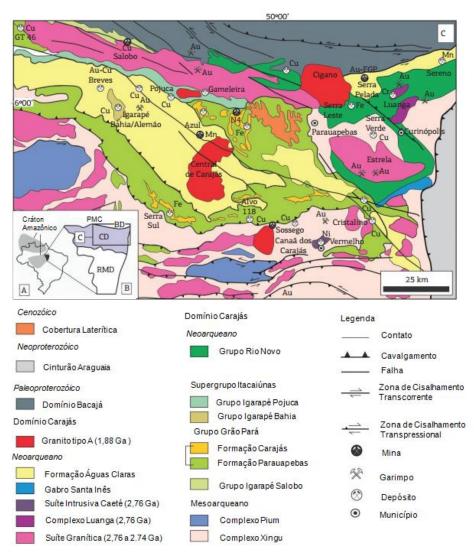


Figura 4.3 - Mapa Geológico do Domínio Carajás. Fonte: Modificado de Vasquez et al. (2008)

O Domínio Carajás apresenta como subdomínios tectônicos principais. os sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento (Figura 4.4). O Sistema Transcorrente Carajás possui como principal estrutura a Falha Carajás, nucleada por volta de 2.6 Ga a 2,0-1,8 Ga, como resultado dos pulsos finais de um evento de transtensão destral atuante na região (PINHEIRO, 1997). É composta por lineamentos descontínuos, anastomosados, com direção preferencial WNW-ESE e extensão total próxima a 180 km (PINHEIRO, 1997).

O Sistema Transcorrente Cinzento é caracterizado por um feixe de falhas curvas e anastomosadas, com direção preferencial WNW-ESE, possuindo como principais feições o *sidewall ripout* do Salobo, o romboedro do Cururu e o splay de Serra Pelada (PINHEIRO, 1997).

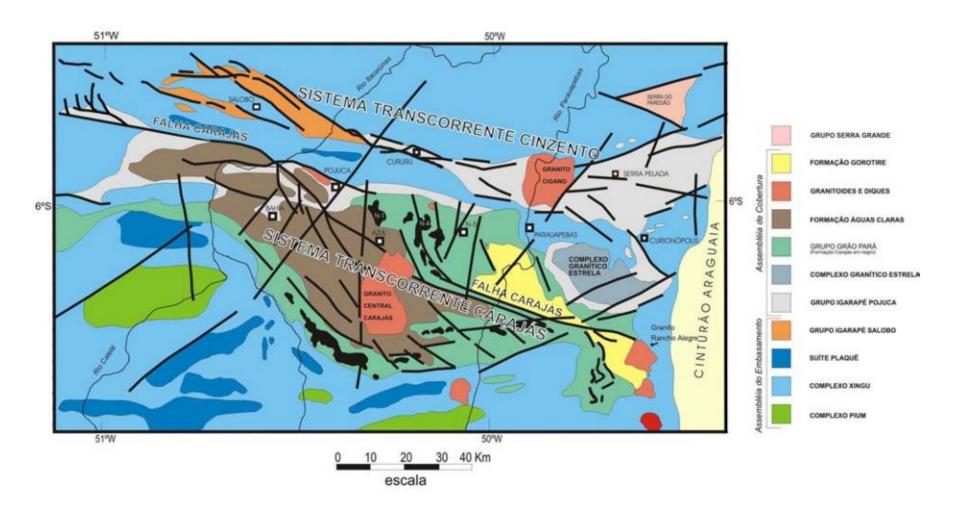


Figura 4.4 - Mapa geológico simplificado de Carajás evidenciando os sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento.

Fonte: Pinheiro (1997)

4.4.1 Compartimentação Geológica Regional

4.4.1.1 Domínio Rio Maria

O Domínio Rio Maria, anteriormente denominado Terreno Granito-Greenstone Rio Maria por Huhn et al. (1988), é formado por *greenstone belts* do Supergrupo Andorinhas e grupos de granitóides arqueanos, como a série Tonalítica-Trondhjemítica-Granodiorítica (TTG), granitóides tipo sanukitóide e leucogranitos potássicos (ALMEIDA et al., 2010). Dentre esses, o Tonalito Arco Verde, da série TTG corresponde ao mais antigo, com aproximadamente 2,9 Ga (MACAMBIRA; LANCELOT, 1996). As unidades do Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria são sobrepostas por metassedimentos da Formação Águas Claras que são seccionados por granitos de idade média de 2,86 Ga (MACAMBIRA; LANCELOT, 1996).

4.4.1.2 Domínio Carajás

O Domínio Carajás (VAZQUEZ et al., 2008) ou Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas (ARAÚJO et al., 1988), inclui a Bacia Carajás e, em sua parte sul, o Subdomínio de Transição (FEIO et al., 2011).

O Domínio Carajás possui embasamento formado por gnaisses de composição tonalítica a trondhjemitica e migmatitos do Complexo Xingu (~ 2,9 Ma) (MACHADO et al., 1991) e granulitos do Complexo Pium. O embasamento é recoberto pelas unidades metavulcanossedimentares do Grupo Rio Novo (2,76 Ma), composto por anfibolitos, xistos, metagrauvacas, toleítico, metavulcânicas e gabros (HIRATA et al., 1982), e pelo Supergrupo Itacaiúnas com idades de ~ 2,76 Ga (DOCEGEO, 1988; MACHADO et al., 1991).

O Supergrupo Itacaiúnas é formado por sequências vulcanossedimentares com diferentes graus metamórficos e deformacionais divididos em quatro grupos: Igarapé Salobo, Grão Pará, Igarapé Bahia e Igarapé Pojuca (MACAMBIRA et al., 1996; TRENDALL et al., 1998). Rochas vulcâncias básicas, intermediárias e félsicas,

formações ferríferas bandadas e rochas metassedimentares clásticas, como xistos pelíticos, quartzitos e arcóseos compõem esses grupos (HIRATA et al., 1982; DOCEGEO 1988; MACHADO et al., 1991).

O Supergrupo Itacaúnas é recoberto pela Formação Águas Claras (NOGUEIRA, 1995), que corresponde ao topo do Grupo Grão Pará. A Formação Águas Claras é subdividida em Membro Inferior e Superior, conforme o seu regime deposicional, incluindo conglomerados, arenitos, mármores dolomíticos, rochas ricas em clorita e talco, siltitos carbonáceos, e quartzitos (NOGUEIRA, 1995).

A Figura 4.5 ilustra o posicionamento estratigráfico da Formação Águas Claras em relação as outras unidades litoestratigráficas da PMC (NOGUEIRA, 1995).

UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS		ERATEMA	IDADE RADIOMÉTRICA
FORMAÇÃO GOROTIRE (?) arenitos líticos feldspáticos e conglomerados polimíticos		PROTEROZÓICO MÉDIO	
G	RANITÓIDES	NO.	1,8-1,9 Ga
	DIQUES	2	
Membro Superior quartzo-arenitos, conglomerados monomíticos, pelitos subordinados Membro Inferior pelitos, siltitos e quartzo- arenitos		ARQUEANO A PROTEROZÓICO INFERIOR	
₹5	Membro Inferior		
pelitos, siltitos e quartzo- arenitos		PROTI	
GRUPO GRÃO-PARÁ metabasaltos, metarriolitos, metassedimentos, formação ferrífera bandada		ERIOR	2,7 Ga
GRUPO IGARAPÉ POJUCA metassedimentos, metavulcânicas básicas, formação ferrifera bandada		o supe	20 III
GRUPO SALOBO quartzitos, gnaisses, anfibolitos, formação ferrifera bandada		QUEAN	
COMPLEXO XINGÚ gnaisses polimetamórficos tonalitico- granodioríticos e migmatitos.		AR	≥ 2,8 Ga

Figura 4.5 - Coluna Estratigráfica das unidades pré-cambrianas da PMC Fonte: Nogueira et al. (1995)

A idade da Formação Águas Claras ainda é incerta (FABRE et al., 2011). A datação de zircões detríticos em arenitos indicou idades de ~ 2,7 Ma (TRENDALL et al. 1998) e ~ 2,6 e 2,7 Ma em metagabros (DIAS et al., 1996; MOUGEOT et al., 1996) restringindo a idade da Formação Águas Claras para o Arqueano. No entanto, outros autores sugerem idade para o Proterozóico (FABRE et al., 2011).

4.4.2 Modelos evolutivos tectônicos

Dentre os modelos de evolução tectônica para a PMC, destacam-se as propostas de Pinheiro (1997) e Veneziani et al. (2004).

Para Pinheiro (1997), a história tectônica da região de Carajás envolve pelo menos cinco episódios tectônicos, a saber:

- Transpressão sinistral dúctil, caracterizada pela presença da trama dúctil E-W, de alta temperatura, desenvolvida nas rochas da Assembléia do Embasamento;
- 2. Transpressão sinistral, episódio onde a trama dúctil E-W foi submetida a reativação rúptil dominada por transcorrências; seguido de evento extensional regional, com a implantação de uma larga bacia intracratônica onde foram depositadas as rochas vulcânicas e sedimentares do Grupo Grão-Pará e da Formação Águas Claras;
- 3. Transtensão destral, resultando no isolamento das rochas da Assembléia de Cobertura por falhas direcionais oblíquas em zonas de subsidência, trechos anastomosados; o desenvolvimento dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento 2.6 Ga seria após a deposição das sequências;
- 4. Transpressão sinistral, gerando a inversão tectônica das sequências vulcânicas e sedimentares. O episódio seria responsável pela deformação moderada a forte das rochas adjacente à Falha Carajás; extensão (ou transtensão) em 1.9 Ga,

possibilitando a intrusão de plútons graníticos e diques máficos do proterozóico.

5. Extensão, episódio onde foram possivelmente depositadas as rochas paleozóicas (SiluroOrdovicianas) da Bacia do Parnaíba; reativação dos sistemas de falhas em um evento extensional durante a abertura do Proto-Atlântico, no Mesozóico (0.24 – 0.15 Ga).

O outro modelo de evolução tectono-estratigráfica para a PMC proposto por Veneziani et al. (2004) é embasado em dados de sensores remotos orbitais, aerogeofísica e dados de campo. A proposta descreve três fases deformacionais principais no intervalo de 2.8 a 1.88 Ga e sucessivos eventos posteriores a 1.88 Ga.

A primeira fase teria afetado as rochas intracrustais do Complexo Granito-Gnáissico, juntamente com as rochas vulcano-sedimentares supracrustais (grupos Sapucaia, Igarapé Salobo e Igarapé Pojuca). A movimentação seria representada por transcorrências sinistrais. Como fatores condicionantes da formação de bacia, vulcanismo e sedimentação, os autores destacam hipóteses de deformação, com deformação extensional. As unidades então foram submetidas a uma deformação evidenciada por zonas de cisalhamento dúctil sinistral E-W e dobras de cisalhamento.

A segunda fase seria caracterizada pelo cisalhamento transcorrente destral-oblíquo ao longo da direção WNW-ESE. O tipo de cisalhamento seria dúctil a rúptil-dúctil, não-coaxial, com vergência de NNW para SSE. Esse evento propiciou o alojamento e a posterior deformação do Complexo Granítico Estrela, bem como a deformação de suas encaixantes.

Com o desenvolvimento da terceira fase, movimentos transpressivos deram origem a estruturas rúpteis a rúpteis-dúcteis. O fluxo de massa tectônica de NE para SW teria atingido zonas de fraquezas e reativado estruturas antigas em movimentação sinistral ao longo da direção principal de cisalhamento. O desenvolvimento desta fase propiciou o

adelgaçamento crustal que controlou o embaciamento, deposição e deformação da Formação Águas Claras e o alojamento dos granitos anorogênicos (1,88 Ga).

4.4.3 Gênese e Geologia da Formação Águas Claras

A Formação Aguas Claras é uma sequência sedimentar de origem marinha e fluvial (NOGUEIRA et al., 1995). De acordo com a razão arenito/pelito, é subdividida em dois membros: Inferior e Superior (NOGUEIRA, 1995).

O Membro Inferior é formado por depósitos de características faciológicas plataformais gerados sob influência de tempestade. É constituído por siltitos, pelitos e arenitos finos com estruturas do tipo estratificação cruzada *hummocky*, laminação plano paralela, além de estruturas produzidas por ondas. A unidade inclui sete fácies sedimentares (com predomínio de pelitos) relacionadas a um sistema deposicional de plataforma marinha (NOGUEIRA et al., 1995).

O Membro Superior é constituído por litofácies de origem litorânea e fluvial do tipo entrelaçado, características que condicionaram a subdivisão do membro (NOGUEIRA, 1995). A Fácies Litorânea, que corresponde a porção basal do Membro Superior, inclui arenitos com estruturas tipo estratificação cruzada, sequência de maré, estratificação cruzada plano paralela e côncava, arenitos com estratificação cruzada e estratificação cruzada côncava. Já a parte superior, denominada como Fácies Fluvial, é formada por conglomerados, microconglomerado e arenitos grossos com estratificação cruzada tabular e acanalada, além de arenitos finos com estratificações plano-paralelas subordinadas, relacionados a depósitos de inundação.

O modelo deposicional proposto por Nogueira et al. (1995) está dividido em três estágios (Figura 4.6). O primeiro está relacionado à deposição de sedimentos finos em mar raso com tempestades esporádicas (Figura 4.6a). Esse sistema deposicional formou o Membro Inferior da Formação Águas Claras. O segundo estágio reflete a progradação de uma planície

aluvionar sobre o litoral, com planície influenciada por maré (Figura 4.6b). No terceiro e último estágio houve a progradação da planície aluvionar e formação do sistema fluvial *tipo braid* (Figura 4.6c). Esses dois estágios culminaram na deposição do Membro Superior da Formação Águas Claras.

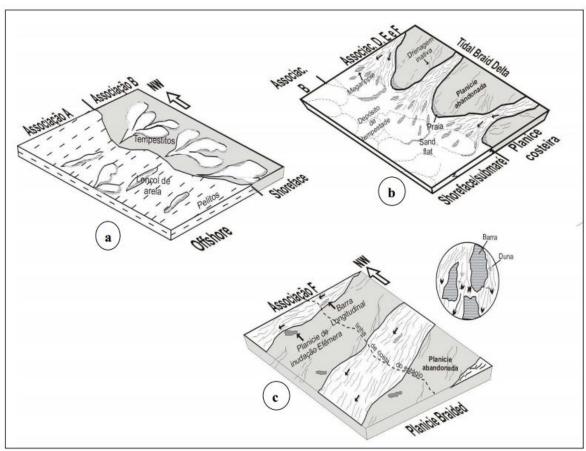


Figura 4.6 - Modelo deposicional para a Formação Águas Claras Fonte: Nogueira (1995)

Em síntese, a Formação Águas Claras apresenta uma sucessão estratigráfica de caráter progradante com depósitos de plataforma marinha sobrepostos por sedimentos influenciados por maré e estes por depósitos fluviais (NOGUEIRA et al., 1995).

4.4.4 Geologia Estrutural da Formação Águas Claras

A Formação Águas Claras está inserida na porção central do Sistema Transcorrente Carajás. No contexto regional, a deformação das rochas da Formação Águas Claras está relacionada a reativação tardia da Falha Carajás ocorrida há 2,6 Ga e 2,0-1,8 Ga (PINHEIRO, 1997). A

deformação possui caráter predominantemente rúptil-dúctil, sendo mais intensa conforme a proximidade com a Falha Carajás.

No geral, as principais feições estruturais presentes nas rochas da Formação Águas Claras são: zonas de cisalhamento sub-verticais com orientação geral NW-SE; dobras: com padrão holomórfico, classificadas como normais, isópacas, fechadas e assimétricas com vergências suaves para SW e planos axiais mergulhando até 75% ENE; e cavalgamentos: em geral, oblíquos, subparalelos à superfície axial das dobras, com projeção nos planos de acamamento da fácies pelítica (PINHEIRO, 1997; NOGUEIRA et al., 1995).

4.4.5 Geologia da Mina do Manganês do Azul e Gênese do Minério de Manganês

A Mina do Manganês do Azul está inserida na sequência sedimentar da Formação Águas Claras e ao longo da respectiva sequência laterítica (COSTA et al., 2005). A mineralização primária de manganês assim como a mineralização secundária estão associadas às rochas do Membro Inferior da Formação Águas Claras (NOGUEIRA, 1995).

As rochas hospedeiras da mineralização primária são siltitos vemelhos a vermelhos listrados que contém lentes decamétricas de siltitos a folhelhos carbonosos (folhelhos negros) da Formação Águas Claras (COSTA et al., 2005). A rodocrosita (protominério carbonático) e a criptomelana (minério com OH-Mn) são as principais mineralizações de manganês de origem primária (BERNADELLI; BEISIEGEL, 1978; VALARELLI et al., 1978).

A gênese da mineralização secundária foi estudada detalhadamente por Costa et al. (2005) e será sintetizada nos próximos parágrafos. De acordo com os autores, esses depósitos se formaram em condições de alta produtividade de matéria orgânica, favoráveis a deposição de OH-Mn (criptomelana) e diagênese para rodocrosita. A área fonte pode ter sido as formações feríferas bandadas arqueanas do Grupo Grão Pará e suas rochas vulcânicas máficas, ambas ricas em Mn, que sob condições oxidantes, formaram OH-Mn que se depositaram em plataforma marinha.

O processo de alteração química e desmantelamento físico dos siltitos da Formação Águas Claras ocorreu a partir de 26 Ma, em várias fases, com consequente formação dos materiais argilosos amarelos a marrons com esferolitos de OH-Mn. A laterização foi um evento muito importante porque promoveu a neoformação de OH-Mn a partir de rodocrosita, cloritas e illita, minerais portadores de Mn²⁺, relativamente propensos ao intemperismo.

Assim, a mineralização secundária desenvolveu-se a partir da alteração e do enriquecimento supergênico da rodocrosita presente na Unidade Inferior da Formação Águas Claras. O perfil laterítico desenvolveu-se sobre a sequência sedimentar, alcançando principalmente uma grande camada de OH-Mn no topo e várias lentes OH-Mn na base. O perfil laterítico é maturo, iniciou o seu estabelecimento no limiar Cretáceo-Eoceno, há 68 Ma.

O perfil laterítico é formado por um espesso horizonte argiloso, estabelecido sobre os siltitos vermelhos e lentes de siltito cinzas a negros da Fomação Águas Claras. Engloba crostas ferro-aluminosas, crostas manganesíferas e materiais argilosos (solo) com esferolitos de manganês e materiais detríticos. O perfil laterítico mostra diferentes horizontes com progressiva alteração físico-química e incremento do conteúdo de argila em direção à superfície, sendo constituído pelos seguintes horizontes: crosta laterítica com bauxita, horizonte argiloso, horizonte argiloso saprolítico e o substrato (Figura 4.7).

No perfil encontram-se os principais tipos de minerais de minério de manganês, sendo predominantemente a criptomelana (herdada e neoformada).

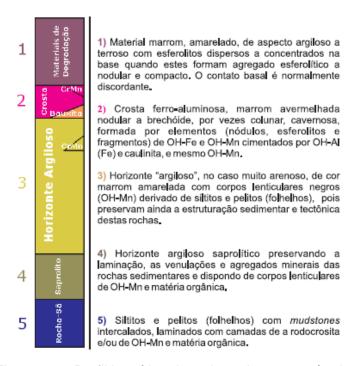


Figura 4.7 - Perfil laterítico das minas de manganês do Azul Fonte: Costa et al. (2005)

Em síntese, de acordo com o relatório técnico da VOGBR (2008), o minério manganesífero do Azul, pode ser subdividido em três grandes grupos tipológicos, a saber:

- Detrítico (DET): é representado pelos materiais dispostos sem orientação em matriz argilosa (blocos, plaquetas e brechas manganesíferas) formados por ação de intemperismo, condições topográficas e variações do lençol freático; possui coloração avermelhada e se distribui superficialmente e subsuperficialmente na jazida.
- Pelítico (PLT = PMR pelito manganesífero rico, PMT pelito manganesífero tabular, TRD transição entre detrítico e pelítico): constituído por pacote de rochas intemperizadas que mantém a estratificação rítmica original alternando leitos escuros manganesíferos com leitos esbranquiçados argilosos/caulínicos; de maneira geral possui coloração cinza escura e apresenta-se ora bastante friável ora em forma de blocos tabulares de fácil desagregação ao impacto.
- Minério de Manganês Maciço (MMM): apresenta-se sob a forma de material granulado irregular, cinza a preto, em matriz pulverulenta

negra ou, raramente, em forma de blocos tabulares ou maciços; é um minério rico com teor acima de 48 % de Mn.

4.4.6 Geologia Estrutural da Mina do Azul

Como mencionado anteriormente, o arcabouço estrutural das rochas da Formação Águas Claras está relacionado a Falha Carajás. A Mina do Azul está posicionada no interior do feixe da Falha Carajás e o padrão de deformação observado nas rochas da mina, reflete parte da história cinemática dessa estrutura maior (SILVA, 2006).

A falha normal associada com uma componente direcional destral, de maior expressão na área da mina, estaria relacionada ao episódio de transtensão destral responsável pela instalação da Falha Carajás, anteriormente a 2,6 Ga (PINHEIRO, 1997). As dobras, as falhas de cavalgamento e as zonas de falhas sub-verticais estariam relacionadas a deformações sob regime de transpressão sinistral, um segundo evento atuante na região responsável pela reativação e inversão da maioria das estruturas próximas à zona da Falha Carajás (PINHEIRO, 1997).

A tectônica na região central de Carajás é compartimentada em diferentes domínios separando diversos blocos divididos por sets de falhas NW-SE e NE-SW (PINHEIRO, 1997). A Mina do Azul se encontra em um desses blocos ao norte da Falha Carajás, onde a movimentação vertical elevou o membro inferior da Formação Águas Claras a níveis mais rasos em relação aos blocos sul onde aflora o membro superior dessa formação (PINHEIRO, 1997).

Na área, a principal estrutura deformada é o acamamento, definido pelo contato das camadas da Formação Águas Claras. Os siltitos apresentam como principais estruturas primárias estratificação primária estratificação cruzada do tipo hummocky e laminação plano-paralela. As feições primárias são indicativos de depósitos marinhos com influência de tempestade e sugerem uma correlação com o membro inferior da Formação Águas Claras descrito por Nogueira (1995).

Segundo Nogueira (1995), as principais estruturas presentes na mina são zonas de cisalhamento sub-verticais: com orientação geral NW-se, às vezes NE-SW; dobras: com padrão holomórfico, classificadas como normais, isópacas, fechadas e assimétricas com vergências suaves para SW e planos mergulhando até 75°/ENE; e cavalgamentos oblíquos subparalelos à superfície axial à dobra.

Pinheiro (1997) identifica dois conjuntos de estruturas principais: (a) dobras: separadas em dois grupos de acordo com o tipo e tamanho. O primeiro grupo é representado pelas dobras centimétricas do tipo kink e chevron. Essas dobras apresentam planos axiais SW-NE com mergulho moderado para NW. O segundo grupo é representado por dobras métricas do tipo fechada, assimétrica com planos axiais E-W com mergulhos subverticais ou NW-SE com mergulho moderado para NE; e (b) falhas e fraturas: as fraturas ocorrem segundo duas orientações principais, ambas com mergulhos altos (> 80), N-S/NNE-SSW e E-W. As falhas são representadas por duas categorias falhas sinistrais reversas com direção E-W.

Em estudo mais recente, Silva (2006) divide a Mina do Manganês do Azul em dois blocos, delimitados por falha normal de direção NW-SE: bloco sul e bloco norte (Figura 4.8). A falha normal está associada como uma componente direcional destral, relacionada ao episódio de transtensão destral responsável pela instalação da Falha Carajás, anteriormente a 2,6 Ga (PINHEIRO, 1997).

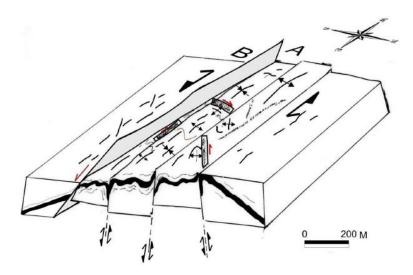


Figura 4.8 - Bloco diagrama representando a geometria das estruturas na Mina do Manganês do Azul. A falha principal com cinemática NW-SE divide a área da mina em dois blocos: um baixo a sul (menos deformado) e um alto a norte (mais deformado).

Fonte: Silva (2006).

O bloco sul encontra-se pouco deformado, apresentando regularidade no acamamento, que possui direção E-W e mergulho para S (SILVA, 2006).

No bloco norte a deformação é mais expressiva, afetando tanto o acamamento como o minério, gerando dobras, falhas inversas NW-SE e zonas de falha subverticais com direção WNW-SES (SILVA, 2006).

O bloco norte, definido como um corredor de deformação por Silva (2006), de acordo com os domínios principais separados pelas falhas normais representados Figura 4.7, possui orientação NW-SE. aproximadamente em um quilômetro de extensão, observam-se dobras assimétricas curvilineares seccionadas por falhas normais sinuosas NW-SE e/ou E-W subordinada à transcorrências destrais gerando em escala de detalhes feições como dobras de arrasto. Observam-se ainda falhas inversas retas e/ou sinuosas NW-SE com dobras de arrasto associadas a zonas de falhas subverticais WNW-ESE com planos movimentação normal e/ou cavalgamento.

4.4.7 Hidrogeologia da Mina do Manganês do Azul

De acordo com o modelo hidrogeológico apresentado pela MDGEO (2006), as principais unidades hidrogeológicas da Mina do Manganês do

Azul são: minério, encaixantes, coberturas e unidades aquíferas em zonas de fraturas.

Nas minas, a principal unidade aquífera é o minério de manganês maciço que apresenta maiores valores de condutividade hidráulica e armazenamento, seguido pelo Pelito rico e Pelito tabular. Estas unidades apresentam porosidade intersticial e de fraturas.

As demais litologias como o Pisólito, Pelito Siltoso, Siltito, Unidade Manganesífera, possuem composições muito argilosas, sendo definidas como aquitardos, devido a pequena condutividade hidráulica e baixa porosidade. Nestas unidades o fluxo de água é bastante incipiente sendo favorecido em algumas regiões devido a presença de fraturamentos que definem uma porosidade secundária.

A unidade hidrogeológica predominante é o siltito (Formação Águas Claras). Nessa unidade, especificamente no flanco norte da Mina 1, há surgência de água do lençól freático.

Como a diferença da pressão hidrostática entre o minério de manganês maciço e o siltito é muito pequena, todas as unidades aquíferas foram consideradas por Souza et al. (2005) como um único sistema aqüífero, não existindo diferença de nível d'água entre as unidades.

4.5. Geologia Local

As principais unidades litológicas na Mina de Manganês do Azul estão representadas no mapa geológico em escala 1:2.000 (Figura 4.9) (VALE S.A., 2012). A mina está inserida na sequência sedimentar da Formação Águas Claras (Siltito, Pelito Manganesífero Siltoso, Pelito Rico e Pelito Tabular) e respectiva topo-sequência laterítica (Pisólito, Material Argiloso e Material Detrítico). O contato entre as unidades pode ocorrer de maneira gradacional ou brusca. Na área predominam litotipos intemperizados, com variados graus de alteração, conforme ilustra a Figura 4.10 e baixa consistência (Figura 4.11).

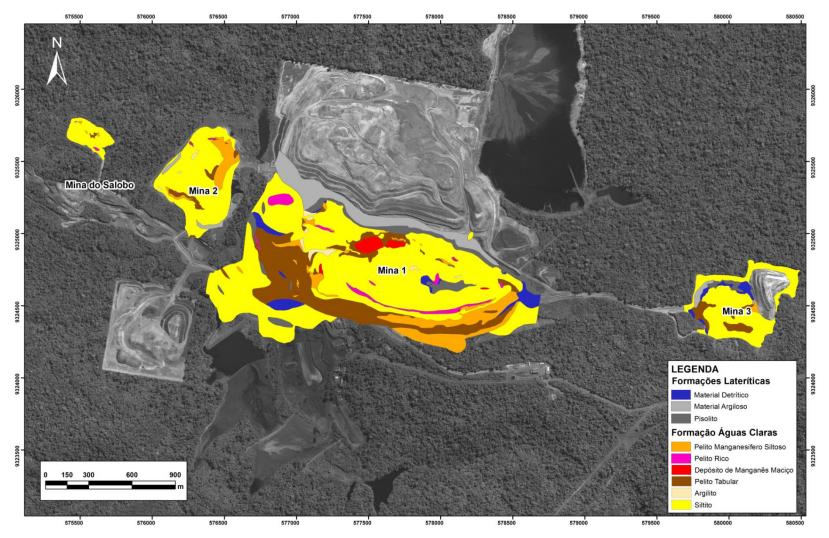


Figura 4.9 - Mapa geológico da Mina do Manganês do Azul. Fonte: Adaptado de Vale S.A. (2012)

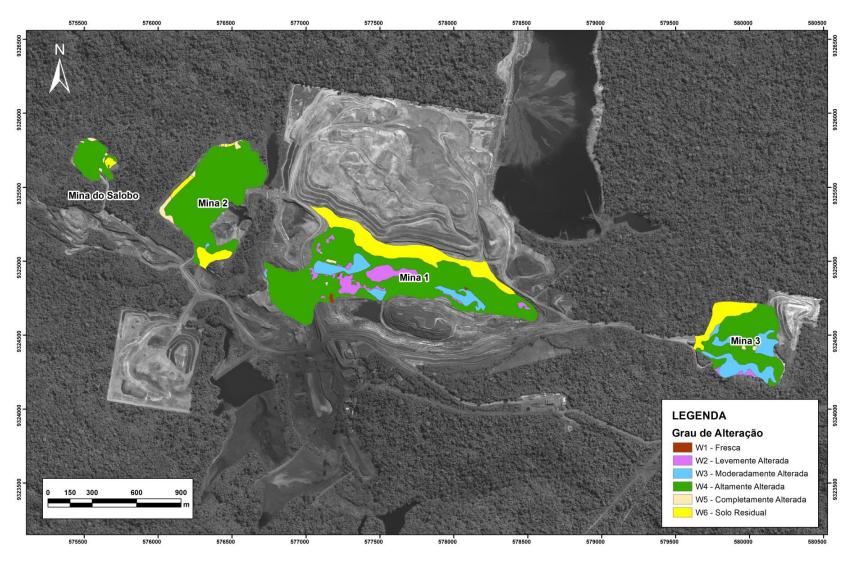


Figura 4.10 - Mapa de graus de alteração da Mina do Manganês do Azul. Fonte: Adaptado de Vale S.A. (2012)

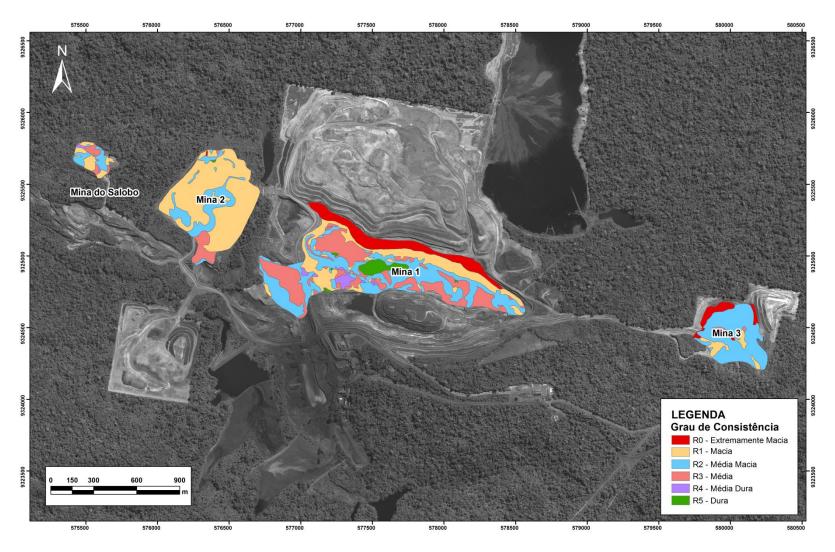


Figura 4.11 - Mapa de graus de consistência da Mina do Manganês do Azul. Fonte: Adaptado de Vale S.A. (2012).

A Mina I consiste, basicamente, de Siltito, com ocorrências localizadas de pelito manganesífero siltoso (PMS), pelito tabular (PT), pisólito e material argiloso. Estes dois últimos litotipos estão presentes na porção norte desta mina, ocupando o nível superior da cava.

A Mina II constitui-se de siltito em toda sua extensão, com manchas isoladas de PMS e uma faixa restrita de material argiloso no limite extremo nordeste.

Os litotipos presentes na Mina III compreendem siltito, material detrítico e solo argiloso. O siltito, litotipo de maior distribuição espacial, encontra-se na porção central da cava. O detrítico localiza-se na porção leste e o solo argiloso e está distribuído em camadas pouco espessas de norte a sudoeste.

A Tabela 4.2 fornece as principais características das litologias da Formação Águas Claras presentes na Mina do Manganês do Azul.

Tabela 4.2 - Descrição das unidades da Formação Águas Claras

Sigla	Denominação	Características	Ilustração
ARN	Arenito	Inserido na parte superior da mina, em contato com o solo argiloso. Apresenta granulometria variando de fina a média e coloração bege esbranquiçada a vermelha (quando apresentam ligeiro enriquecimento em OH-Fe)	
SIL	Siltito	Unidade dominante na mina. Composta por silte e argila, de cor branca, rosa e vermelha. Presença de estratificação definida de escala milímétrica a centimétrica. Contém ou não mineralização de óxi- hidróxidos de Mn	

Continua

Tabela 4.2 - Conclusão

PMS	Pelito manganesífero siltoso	Composição silto-argilosa, de cor rosa com lâminas cinzas constituídas por material manganesífero	
PMT	Pelito tabular	Constituída de material manganesífero intercalada com níveis pelíticos de cor rosa. Apresenta estratificação tabular. As camadas de manganês podem variar de mm até 5 cm de espessura	
PMR	Pelito manganesífero rico	Material manganesífero de cor preta. Apresenta estratificação e uma pequena porção de silte. Alto teor de manganês (OH- Mn)	
MMM	Minério de manganês maciço	Material granulado ou sob forma de blocos de coloração cinza escura a preta. Resistência maciça e ocorre em sua maioria na forma de lentes. Constituído basicamente de OH-Mn (criptomelana)	

Fonte: Vale S.A. (2012) e Costa et al. (2006)

A estrutura dominante para o siltito, argilito, pelito rico e pelito tabular é o acamamento, com direções de N63W/36SW e N74W/43NE. O mergulho da foliação (acamamento) varia entre de SW a NE.

As litologias siltito, argilito e pelito rico e pelito tabular apresentam famílias de fraturas com direções muito variáveis e com ângulos médios de mergulho em

torno de 67° a 71° (Tabela 4.3). As descontinuidades são verificadas basicamente nas litologias siltito, argilito e pelito rico e pelito tabular pertencentes à Formação Águas Claras. A Figura 4.12 ilustra quatro famílias de fraturas principais com direções variáveis, observa-se fraturas obliquas, e semiparalelas ao acamamento do pelito tabular.

Tabela 4.3 – Atitudes (Mergulho/Direção) das famílias de fraturas mapeadas

Fraturas	Atitudes (Direção/mergulho)
FAMILIA A	N47W/71NE
FAMILIA B	N39E/69SE
FAMILIA C	N46W/67SW
FAMILIA D	N41E/68NW

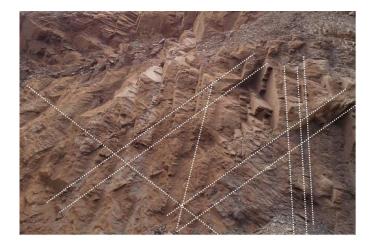


Figura 4.12 – Famílias de fraturas em Pelito Tabular. Fonte: Vale S.A. (2012)

A Tabela 4.4 fornece as principais características das litologias da Formação Laterítica.

Tabela 4.4 - Descrição das unidades da Formação Laterítica.

Sigla	Denominação	Características	Ilustração
SAG	Material Argiloso	É encontrado em toda a mina, capeando as demais rochas (material de superfície) (~ 6 m de espessura). Material silteargiloso, incoeso, coloração amarela. Contém porções variadas de fragmentos centimétricos e esferólitos de OH-Mn e/ou OH-MnFeAI.	
PIS	Pisólito	Apresenta uma matriz argilosa de cor amarela com espessos pacotes de esferolitos. Possui películas concêntricas de de OH-Mn e/ou OH-MnFe e/ou OH-FeAI, além de caulinita.	
DET	Material detrítico	Material argilo siltoso. Representado por fragmentos manganesíferos angulosos e mal selecionados (grânulo a matacão). Contém crostas lateríticas, bauxitas e massas de OH-Mn.	

Fonte: Vale S.A. (2012) e Costa et al. (2006)

As unidades lateríticas como Pisolitos, Material Argiloso, Detrítico e Canga, não apresentam estruturas de acamamento ou fraturas visíveis (Fraturamento Ausente).

4.6 Aspectos Geomecânicos

A Figura 4.13 mostra a distribuição das classes geomecânicas RMR (BIENIAWSKI, 1989) para a Mina do Manganês do Azul (VALE S.A., 2012). Na área predominam siltitos de baixa qualidade geomecânica classes V (Muito Ruim) e IV (Ruim). Maciços de boa qualidade (Classe III) ocorrem localizadamente, como corpos isolados.

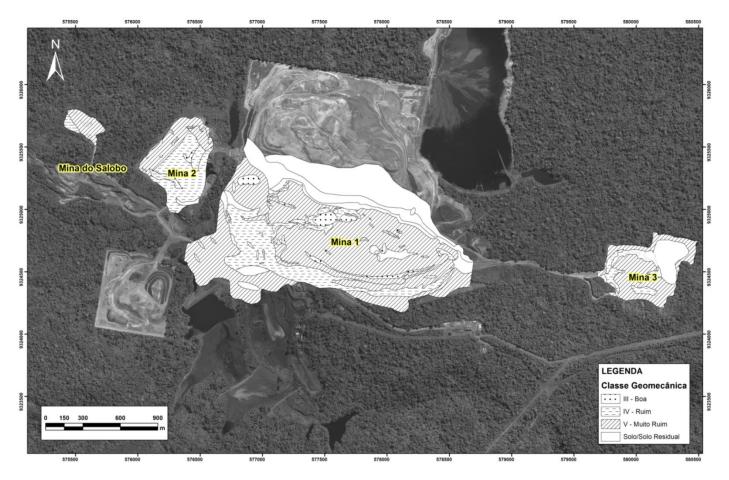


Figura 4.13 - Classes geomecânicas RMR para a Mina do Manganês do Azul. Fonte: Adaptado de Vale S.A. (2012).

4.7 Identificação dos tipos de ruptura de taludes em rocha

O mapeamento litoestrutural e litogeomecânico da Mina do Manganês do Azul em escala 1:2.000 (VALE S.A., 2012) mostrou que as falhas e fraturas presentes no siltito são as principais estruturas condicionantes da estabilidade dos taludes nas três minas (Figura 4.14).



Figura 4.14 - Rupturas planares e em cunha ocasionadas por famílias de fraturas no flanco norte da Mina 1.

Fonte: Vale S.A. (2012)

Com base nos critérios estabelecidos por Hoek e Bray (1981), as Tabela 4.5 e 4.6 apresentam possíveis rupturas com base nas atitudes das fraturas em quatro pontos do siltito localizado flanco norte e flanco Sul da Mina 1.

Tabela 4.5 - Análise Cinemática a nível de bancada para o flanco norte da Mina 1.

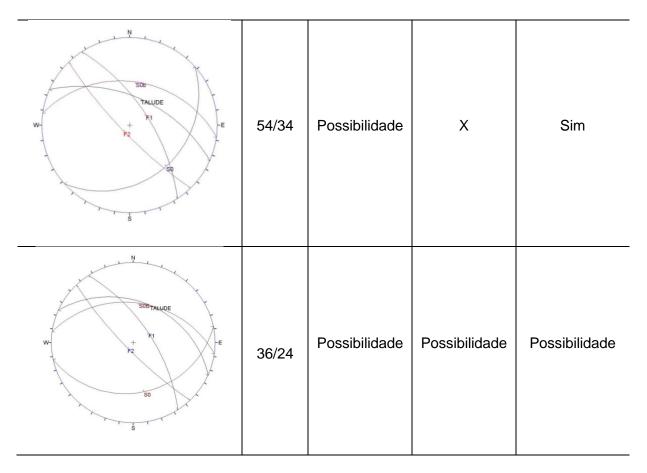
Análise Cinemática	Talude	Ruptura Planar	Ruptura em Cunha	Tombamento
N F2 + E So Ruptura Planar	203/54	Sim	Possibilidade	X
W F2 + E	203/36	Sim	X	X
N F2 + F1 +	ZZ 1/6 1 1 Goolemaag 1 Goolemaa		Possibilidade	Possibilidade

W F2 + F1 F2 F	221/36	Possibilidade	X	X
----------------	--------	---------------	---	---

Fonte: Adaptado de Vale S.A. (2012)

Tabela 4.6 - Análise Cinemática a nível de bancada para o flanco sul o da Mina 1.

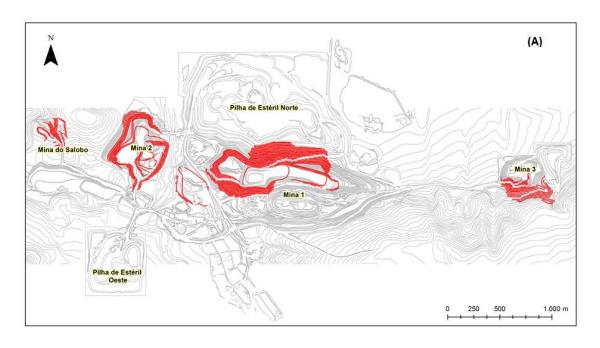
Análise Cinemática	Talude	Ruptura Planar	Ruptura em Cunha	Tombamento
N TALUDE + K! -E	54/34	x	Possibilidade	Possibilidade
TALUDE E	36/34	x	Possibilidade	Possibilidade



Fonte: Adaptado de Vale S.A. (2012)

4.8 Plano de lavra

Os planos de lavra elaborados pela Vale S.A. da Mina do Manganês do Azul para 2012 e 2013 estão apresentados na Figura 4.15. A informação é fundamental para esta pesquisa, uma vez que indica as áreas da mina que serão explotadas, e, portanto, apresentarão baixa coerência. Conforme esta figura, está planejada a lavra parcial de todas as cavas para esses anos.



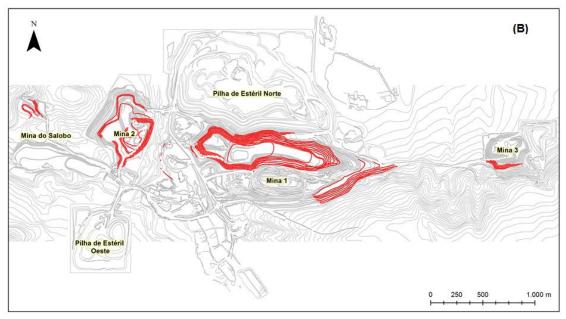


Figura 4.15 - Plano de lavra da Mina do Manganês do Azul, em vermelho estão as áreas que foram lavradas no período de: (A) 2012 e (B) 2013. Fonte: Vale S.A. (2013)

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais

Na presente pesquisa foram utilizados os seguintes materiais:

- 33 cenas no formato Single Look Complex (SLC) do TSX-1 adquiridas em órbita ascendente, modo *StripMap* e polarização HH no período entre 20 de março de 2012 a 07 de abril de 2013 (Figura 5.1). A resolução espacial das cenas em azimute equivale à 3,3 m e em alcance à 1,9 m e o intervalo de incidência equivale à 39° (*near range*) a 42° (*far range*);
- MDE preciso com acurácia vertical de 1,5 m de RMSE gerado no software PCI Geomatics (versão 2013) a partir de um par estéreo de imagens pancromáticas do satélite GeoEye-1 adquiridas em 01 de julho de 2012 (PARADELLA; CHENG, 2013);
- Software GAMMA Remote Sensing (WERNER et al., 2000), módulos
 IPTA, ISP, DIFF/GEO e DISP para o processamento interferométrico;
- Software ArcGIS 10 (ESRI) para a confecção dos layouts dos mapas de deformação;
- Imagens ortorretificadas GeoEye-1 pancromática e multiespectral da área de estudo com resolução espacial de 3 metros. O processamento de ortorretificação foi executado no módulo OrthoEngine, disponível no software PCI Geomatics (versão 2013);
- Relatórios técnicos e dados litoestruturais e geomecânicos atualizados da Mina de Manganês do Azul fornecidos pela Vale S.A.;
- Dados de pluviometria da Estação da Mina de Manganês do Azul do período entre março de 2012 e abril de 2013 fornecidos pela Vale S.A.;
- Planos de lavra de 2012 e 2013 da Mina do Manganês do Azul;

 Dados do SSR fornecidos pela Vale S.A. para a validação dos resultados de deformação (LoS) do período seco.

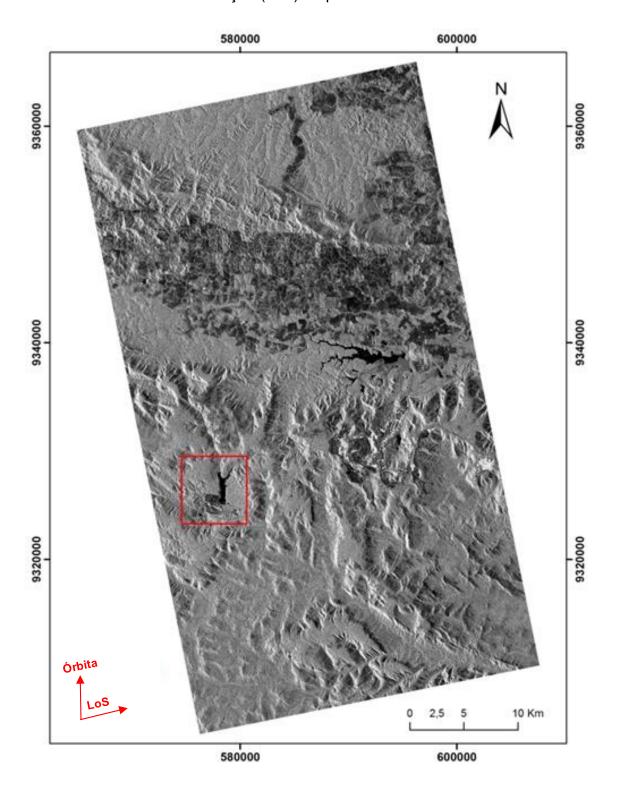


Figura 5.1 - Imagem *StripMap* geocodificada do TSX-1, com destaque em vermelho da área de estudo.

5.2 Método

A metodologia empregada na presente pesquisa inclui quatro etapas principais: o processamento interferométrico preliminar a partir das 33 cenas no formato TSX-1 e do MDE, adotando as abordagens DInSAR simples e IPTA; a averiguação dos resultados interferométricos obtidos em campo; processamento interferométrico definitivo onde foi incluído mais um método (DInSAR TS); elaboração do banco de dados com os resultados interferométricos e a análise dos resultados, como apresentado na Figura 5.2.

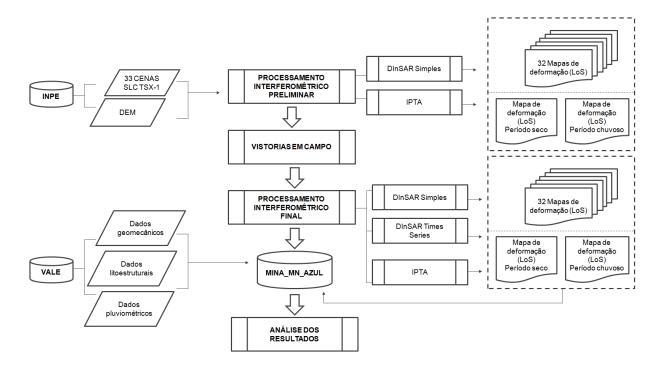


Figura 5.2 - Fluxograma de atividades de pesquisa.

5.2.1 Trabalho de Campo

O trabalho de campo na Mina do Manganês do Azul foi realizado em março de 2014. O objetivo foi verificar *in situ*, juntamente com a equipe de Geotecnia da Vale S.A., as áreas que apontaram instabilidades nos mapas de deformação (LoS) preliminares, especificamente os taludes de bancada no flanco norte da Mina 1 (Figura 5.3). Assim, as análises de campo deram ênfase nessas áreas. De acordo com a Vale S.A. (2012), essa porção da mina vêm apresentando um histórico de instabilidades nos últimos anos devido a fragilidade geomecânica das rochas, a presença de fraturas e a surgência do lençól freático na área

onde estão escavados os taludes. No local, foram analisados os aspectos litoestruturais e hidrogeológicos dos taludes de bancada. Além disso, tentou-se reconhecer possíveis sinais indicativos de áreas instáveis, como trincas, rachaduras e escorregamentos.



Figura 5.3 - Escorregamentos nos taludes de bancada do flanco norte da Mina 1.

5.2.2 Processamento Interferométrico

Na presente pesquisa foram utilizadas três abordagens interferométricas: a DInSAR simples e a DInSAR TS, ambas implementadas no módulo DIFF/GEO do software GAMMA, e a aborgadem PSI, implementada no módulo IPTA do mesmo software (WERNER et al., 2002).

5.2.2.1 Abordagem DInSAR simples

A metodologia DInSAR simples gera mapas de deformação (LoS) a partir de um par de imagens SAR. No presente trabalho foram confeccionados 32 mapas de deformação (LoS) a partir da combinação par a par das 33 cenas TSX-1 da área de estudo. A técnica envolve um conjunto de operações sequenciais, de acordo com a Figura 5.4.

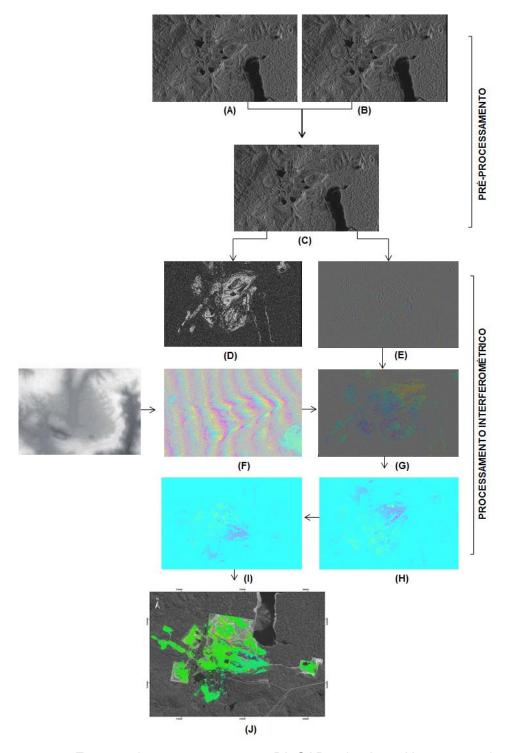


Figura 5.4 - Etapas do processamento DInSAR simples. Na etapa do préprocessamento é feito o corregistro entre a imagem escrava (B) em relação a imagem mestre (A). A partir da imagem (C) devidamente corregistrada, são obtidos dois produtos interferométricos: a imagem de coerência (D) e o interferograma complexo (E). Na próxima etapa, o software simula a fase referente à topografia a partir do MDE (F) e posteriormente subtrai com o interferograma complexo, obtendo o interferograma diferencial (G). A partir de então, atribui-se um valor de deslocamento em LoS para a diferença de fase (H). Na próxima etapa, é feita a geocodificação (I) e posteriomente tem-se o mapa de deformação final (J).

Na etapa de pré-processamento são selecionadas duas cenas no formato SLC. Após a seleção, é necessária a conversão das imagens para o formato SLC_par para que possam ser importadas e processadas no software GAMMA (WEGMULLER, 2005).

Na etapa de pré-processamento, é feito o corregistro preciso da imagem escrava (mais recente) em relação a imagem de referência (mais antiga). O resultado do corregistro de 5.4B em relação a 5.4A é a Figura 5.4C. Esse procedimento é uma das operações mais importantes, pois a qualidade do interferograma depende da precisão com que as duas imagens estão corregistradas (ZHENFANG et al., 2007). Com o uso do *software* GAMMA a precisão no corregistro é elevada, com desvios dos deslocamentos em range e em azimute inferior a 0,1 - 0,2 pixels (WEGMULLER, 2005).

Após o corregistro, são gerados dois sub-produtos interferométricos independentes: a imagem de coerência (Figura 5.4D) e o interferograma complexo (Figura 5.4E). Ambos são formados a partir das imagens de referência e escrava reamostradas e filtradas (ZEBKER et al., 1992).

A etapa de formação da imagem de coerência é fundamental para medir a correlação existente entre as duas imagens e avaliar a qualidade do interferograma que será formado na etapa seguinte (HANSSEN, 2001).

O interferograma complexo, por sua vez, resulta do produto da imagem de referência pelo complexo conjugado da imagem escrava de uma mesma área, adquiridas em posições ligeiramente diferentes (HANSSEN, 2001). A fase absoluta do interferograma complexo registra as componentes da fase referente à topografia, à deformação, à atmosfera e aos ruídos acumuladas entre as duas datas de observação (MASSONET et al., 1993).

Na etapa seguinte, o interferograma complexo é filtrado espacialmente através do filtro de Goldstein e Werner (1998) para redução do ruído Speckle (janela de 64 x 64 pixels). A filtragem do interferograma é fundamental, pois reduz o número de resíduos presentes no interferograma e suaviza as franjas interferométricas, de modo a assegurar uma boa performance do desdobramento da fase (HANSSEN, 2001) Após a filtragem, o algoritmo de

fluxo de custo mínimo – MCF (COSTANTINI, 1998) executa o desdobramento de fase no domínio espacial do interferograma complexo.

A Figura 5.4F representa o interferograma sintético formado pela simulação da fase topográfica a partir do MDE. A simulação de fase a partir do MDE consiste em transformá-lo para coordenadas da imagem (alcance e azimute) e escalá-lo proporcionalmente a linha de base do par interferométrico (STROZZI et al. 2001; ROCCA et al. 2000).

A Figura 5.4G corresponde ao interferograma diferencial obtido através da subtração do interferograma sintético em relação ao interferograma complexo desdobrado. No GAMMA, para o par interferométrico simula-se a fase interferométrica absoluta (inicial) e subtrai-se do interferograma sintético, resultando assim no interferograma diferencial (WEGMULLER, 2005). Após essa etapa, a informação da fase é referente ao somatório da componente da atmosfera, ruído, deformação e possíveis erros do MDE adotado.

A Figura 5.4H a corresponde ao mapa de deformação na linha de visada do sensor (LoS), resultante da conversão da fase desdobrada em deslocamento. Como o mapa de deformação gerado pelo software GAMMA está no formato slant range, é necessário geocodificá-lo. Geocodificação (SAR Geocoding) é o processo de transformação de uma imagem SAR em slant range para a projeção de um mapa (MEIER et al.,1993). A Figura 5.4I corresponde ao mapa de deformação LoS geocodificado a partir das efemérides do TSX-1 e do MDE Finalmente, a Figura 5.4J corresponde ao mapa de deformação em LoS geocodificado final, já editado no ArcGIS, sobreposto a imagem GeoEye-1 ortorretificada.

5.2.2.2 Abordagem DInSAR-TS

Para gerar mapas da taxa de deformação do período de aquisição das cenas TSX-1, foi testada a abordagem DInSAR TS na Mina do Manganês do Azul. A primeira etapa dessa metodologia corresponde ao corregistro preciso da pilha de cenas SAR em relação a imagem de referência (mestre), que apresenta menor linha de base perpendicular para limitar a descorrelação geométrica (ZEBKER; VILLASENOR, 1992) e posiciona-se no centro da série temporal

para que a coerência interferométrica seja maximizada (Figura 5.5). Para o processamento, dividiu-se o stack das 33 cenas TSX-1 em dois: o do período seco e o período chuvoso. No primeiro grupo, selecionou-se as 19 primeiras cenas, correspondentes ao período seco, entre 20 de março a 04 de outubro de 2012, sendo a imagem de 08 de julho adotada como a de referência. O segundo grupo é formado por 15 cenas correspondentes ao período chuvoso, adquiridas entre o período de 04 de outubro de 2012 e 20 de abril de 2013, sendo a imagem de 20 de dezembro de 2012 adotada como referência. O objetivo dessa divisão foi observar a influência da precipitação na estabilidade global dos taludes de bancada.

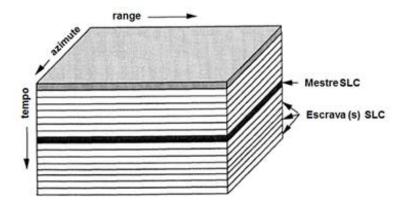


Figura 5.5 - Registro das imagens SLC em relação a imagem mestra.

A Figura 5.6 ilustra o fluxo de processamento da metodologia DInSAR-TS. Na etapa seguinte ao corregistro são gerados os interferogramas diferenciais, par a par, onde cada par interferométrico diferencial é construído em um dado intervalo de tempo (Δt) segundo as regras de menor intervalo de tempo entre as aquisições ou de subconjunto de linha de base curtas (SBAS – BERARDINO et al., 2002). O objetivo disso é minimizar efeitos como a descorrelação espacial e erros topográficos.

Todos os interferogramas devem ser obtidos utilizando uma operação "multi-look" 2x2, resultando em um pixel de dimensão de 2,6 por 3,8 m em alcance e em azimute, respectivamente. Uma filtragem espectral adaptiva com tamanho de janela 124x124 pixels é aplicada sobre os interferogramas para gerar as imagens de coerencia interferométrica, baseado no trabalho de Goldstein et al. (1998).

A seleção dos pares interferométricos diferenciais, para a análise da série temporal DInSAR, é realizada com base no critério de maior coerência interferométrica média, de modo a reduzir os erros de desdobramento de fase. Regiões com coerência inferior a 0,3 foram desconsideradas.

Os interferogramas diferenciais foram obtidos pela remoção da fase referente ao MDE. Um ponto de referência foi escolhido (em uma área estável) e sua fase removida de todos os interferogramas diferenciais, gerando uma pilha de interferogramas diferenciais em relação a um ponto de referência estável. Para o processo de desdobramento da fase dos interferogramas foi realizado utilizase o algoritmo MCF (CONSTANTINI, 1998).

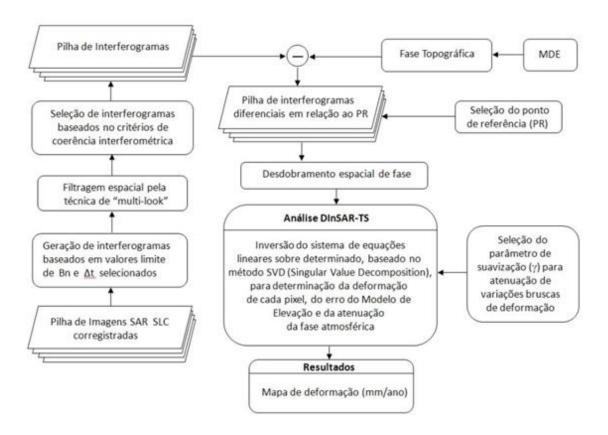


Figura 5.6 - Fluxograma de processamento da metodologia DInSAR-TS.

A partir da pilha de interferogramas diferenciais, aplicou-se em cada pixel (com coerência maior que a estabelecida) a análise temporal através da solução do sistema de equações baseadas no método SVD, com parâmetro de suavização da série temporal $\gamma = 1,6$. A partir do resultado deste processamento são gerados os mapas de deformação e de qualidade das medidas de deformação obtidas (Figura 5.7).

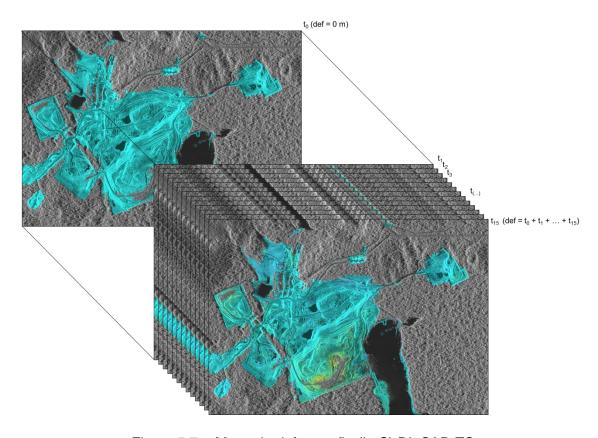


Figura 5.7 - Mapa de deformação (LoS) DInSAR-TS.

5.2.2.3 Abordagem PSI

Para alcançar resultados mais precisos e detalhados com dados em plena resolução, emprega-se a metodologia PSI utilizando o módulo de processamento IPTA da empresa *Gamma Remote Sensing*. A abordagem IPTA é baseada na análise temporal de um conjunto de imagens SAR interferométricas, onde, selecionam-se pixels com espalhadores persistentes (PS) no tempo. No intuito de se avaliar os efeitos da precipitação sobre a quantidade de PS presentes nos taludes da Mina do Manganês do Azul, dividise as imagens em dois conjuntos, um referente à época seca (março a outubro de 2012) e outro referente à época chuvosa (outubro de 2012 a abril de 2013).

No processamento interferométrico no módulo IPTA as etapas principais estão representadas na Figura 5.8 (WEGMÜLLER et al., 2004; WERNER et al., 2003).

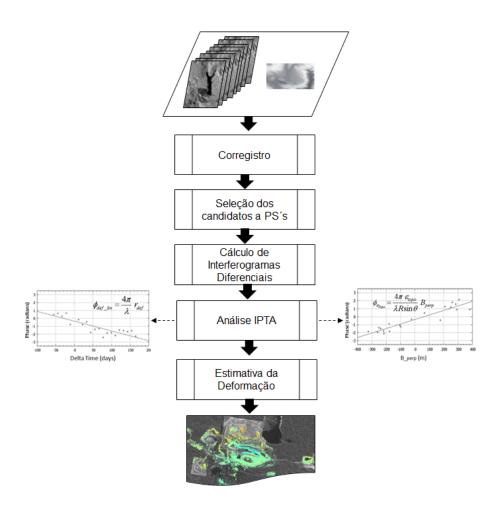


Figura 5.8 - Procedimento metodológico do PSInSAR no módulo IPTA. Fonte: Adaptado de Wegmüller et al. (2004) e Werner et al. (2003).

Os dados de entrada necessários para o processamento interferométrico IPTA são: conjunto de imagens no formato SLC (de 15 a 20), vetores das características da plataforma e o MDE de referência. A primeira etapa dessa metodologia inclui o corregistro de alta qualidade das imagens em relação a imagem de referência e o *stack* das imagens corregistradas (processo idêntico a metodologia DInSAR TS), assim como a geocodificação da imagem de referência.

A partir do *stack* das imagens corregistradas, o *software* identifica uma lista de candidatos a PS. Há dois critérios para a identificação de candidatos a PS no módulo IPTA: variabilidade temporal do retroespalhamento (Figura 5.9A) e diversidade espectral (Figura 5.9B). O primeiro equivale ao índice de dispersão da fase (D_A) proposto por Ferretti et al. (2000), e é recomendado para um grande *stack*. O segundo baseia-se no fato de que a refletividade de um PS permanecer aproximadamente constante durante todas as observações,

mesmo sob diferentes geometrias da aquisição da imagem SAR. Na etapa seguinte, através do comando *pt* presente no GAMMA, ocorre a junção dos candidatos a PS (Figura 5.9C).

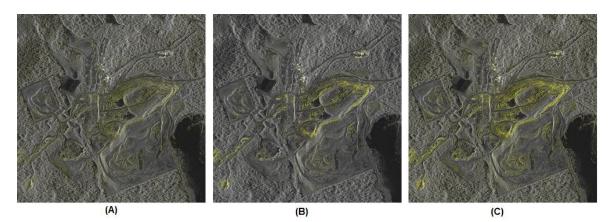


Figura 5.9 - Seleção da lista de candidatos a PS na Mina 1 do Complexo do Azul a partir dos critérios (A) Variabilidade temporal; (B) Diversidade espectral; (C) Fusão de (A) e (B).

Na próxima etapa, calcula-se para cada PS a fase interferométrica entre as imagens que compõem o conjunto utilizado em relação a imagem mestre (Figura 5.10).

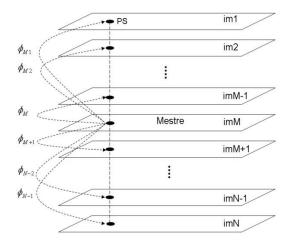


Figura 5.10 - Representação das fases interferométricas de um PS em relação a imagem Mestre, para um conjunto de N imagens.

Cada componente da fase interferométrica de um PS é composta por várias contribuições: da topografia ϕ_{hi} , da deformação ϕ_{di} , da atmosfera ϕ_{atm} , do erro na estimativa da linha-base $\phi_{\beta i}$ e do erro introduzido por ruídos $\phi_{\eta i}$, podendo ser representada pela Equação 5.2:

$$\phi_{Mi} = \phi_{hi} + \phi_{di} + \phi_{atm} + \phi_{\beta i} + \phi_{\eta i}$$
, para i = 1,2,3...N-1 (5.2)

O objetivo da metodologia IPTA é separar a componente de fase referente a deformação (ϕ_{di}).

Com a informação da fase de cada PS, são gerados os interferogramas complexos (Figura 5.11A). Seguidamente, para cada par interferométrico simula-se a fase interferométrica absoluta com base na estimativa das linhas base e do MDE (Figura 5.11B), e subtrai-se do interferograma complexo relacionado, o que resulta nos interferogramas diferenciais (Figura 5.11C).

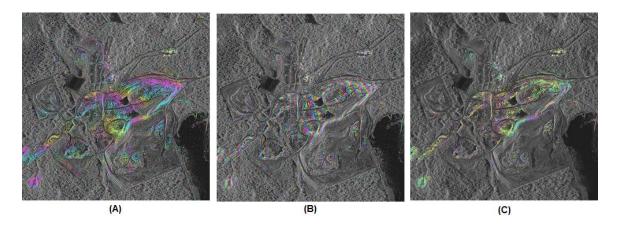


Figura 5.11 – Interferogramas da Mina 1 do Complexo do Azul (A) Interferograma complexo; (B) Interferograma sintético; (C) Interferograma diferencial.

Subtraindo a fase referente ao MDE, a componente da fase interferométrica diferencial resultante do PS pode ser representada pela Equação 5.3. No entanto, ainda há uma contribuição na fase interferométrica do erro do MDE utilizado, que pode ser representada por φεhi.

$$\phi_{DMi} = \phi_{Ehi} + \phi_{di} + \phi_{atm} + \phi_{\beta i} + \phi_{\eta i}$$
, para i = 1,2,3...N-1 (5.3)

Na análise interferométrica estima-se as diferentes contribuições da fase interferométrica até que suas componentes sejam isoladas. No módulo IPTA isso é feito por meio de regressões bidimensionais com relação à linha-base perpendicular e ao tempo (Figura 5.12). Cada ponto do gráfico de regressão corresponde ao valor de fase do interferograma diferencial de um PS com relação a um ponto de referência estável adotado. Primeiramente é realizado o desdobramento de fase no sentido temporal, em seguida, é explorada uma característica importante da fase relacionada ao erro do modelo de elevação, a sua dependência linear com a linha de base normal das várias aquisições

(Figura 5.12A). A segunda regressão linear do modelo 2D é referente a deformação, que é assumida ser linear no tempo (Figura 5.12B). A inclinação da reta de regressão da Figura 5,12A está relacionada a correção de elevação devido a imprecisões no DEM. A inclinação da reta de regressão da Figura 5,12B está relacionada a taxe de deformação.

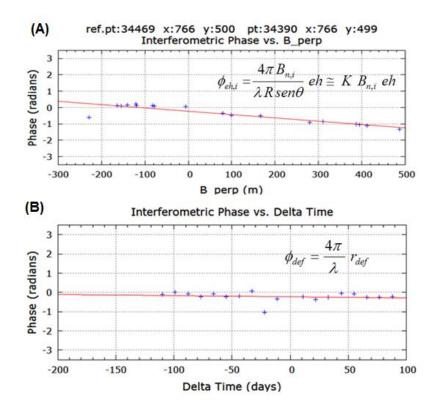


Figura 5.12 - Regressão bidimensional da diferença de fase interferométrica diferencial entre um PS e o ponto de referência, para um conjunto de 18 interferogramas (pontos no gráfico) gerados para a Mina do Manganês do Azul: (a) Fase x B_n e (b) Deformação x tempo.

Os resíduos da regressão linear da deformação contém as componentes de fase relacionadas a fase atmosférica, bem como as componentes de fase relacionadas a deformação não-linear e ruídos. Estes resíduos são filtrados espacialmente para minimizar a fase atmosférica, bem como os ruídos de fase, possibilitando a recuperação da componente de fase relacionada a deformação não-linear. A análise PSI é realizada para todos os pontos de retorno persistente, possibilitanto a geração de um mapa de deformação da área de trabalho, bem como de um mapa da qualidade de cada ponto analizado.

Um dos aspectos importante da técnica IPTA é a possibilidade do processamento interativo, passo a passo para refinamento do modelo

(atualizar o MDE, atualizar taxas de deformação, o refinamento da linha de base, descartar pontos não apropriados).

5.2.3 Banco de Dados

elaborado Durante pesquisa foi um banco de dados (MXD MINA_MN_AZUL), em formato MXD (ArcMap GIS Project File), criado na versão 10.0 da plataforma ArcGIS (ESRI), segundo a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) e o DATUM WGS84 para a Zona 22 Sul. A base georreferenciada adotada é a imagem GeoEye-1 ortorretificada, com resolução espacial de 1 m. No banco de dados estão presentes os dados de deformação obtidos pelas três abordagens interferométricas. Além desses, também estão as shapes obtidas através da vetorização dos seguintes mapas: geológico, geomecânico, de alteração, de consistência e de fraturamento, todos fornecidos pela Vale S.A. No banco de dados, também estão o DEM, as ortoimagens (multiespectral e pancromática), as 33 imagens da área no formato SLC do TSX-1.

5.2.4 Análise de Resultados

Os resultados dos mapas de deformação (LoS) da Mina de Manganês do Azul foram correlacionados com os dados litoestruturais, geomecânicos e pluviométricos fornecidos pela empresa Vale S.A. juntamente com os dados de campo e da literatura. O mapeamento litoestrutural e litogeomecânico da Mina do Manganês do Azul desenvolvido por Vale S.A. (2012) forneceu subsídios para os estudos e análises sobre os problemas de instabilidade dos taludes detectados através do processamento interferométrico.

6 RESULTADOS

6.1 Processamento DInSAR

A área da Mina do Manganês do Azul compreende um polígono de 3.000 colunas e 1.800 linhas de imagem. A metodologia DInSAR Simples gerou 32 mapas de deformação (LoS) a partir da combinação das 33 imagens SAR no formato SLC. A Tabela 6.1 apresenta os principais parâmetros dos pares interferométricos. De acordo com a Tabela 6.1, os pares com maior linha base perpendicular são 3, 4, 9, 10, 14, 17, 12, 21, 22.

Tabela 6.1 - Parâmetros dos pares interferométricos (DInSAR simples).

Par	Imagem mestre (ano/mês/dia)	Imagem escrava (ano/mês/dia)	B _{perp} (m)	B _{paralela} (m)	B _{temporal} (dias)	h _a (m)
1	20120320	20120331	-162,129	-286,988	11	41,144
2	20120331	20120411	-58,138	-47,225	11	114,740
3	20120411	20120422	552,225	380,256	11	12,079
4	20120422	20120503	-531,291	-405,135	11	12,555
5	20120503	20120514	218,620	158,759	11	30,513
6	20120514	20120525	287,941	209,481	11	23,167
7	20120525	20120605	-393,476	-210,706	11	16,953
8	20120605	20120616	-222,285	-178,789	11	30,010
9	20120616	20120627	715,906	499,462	11	9,317
10	20120627	20120708	-487,300	-357,796	11	13,689
11	20120708	20120719	-163,816	-133,953	11	40,721
12	20120719	20120730	443,349	338,594	11	15,046
13	20120730	20120810	115,255	64,365	11	57,878
14	20120810	20120821	-515,644	-336,452	11	12,936
15	20120821	20120901	42,496	43,240	11	156,974
16	20120901	20120912	-76,040	-79,091	11	87,726
17	20120912	20120923	464,158	278,107	11	14,371
18	20120923	20121004	-143,283	-94,030	11	46,556
19	20121004	20121015	196,212	158,946	11	33,997
20	20121015	20121026	-10,369	14,227	11	643,329
21	20121026	20121106	-554,759	-366,378	11	12,024
22	20121106	20121117	422,815	249,678	11	15,777

Continua

23	20121117	20121128	-115,614	-14,259	11	57,698
24	20121128	20121209	-53,130	-75,201	11	125,555
25	20121209	20121220	172,329	120,781	11	38,709
26	20121220	20130111	-201,354	-108,973	22	33,129
27	20130111	20130122	-133,849	-110,036	11	49,838
28	20130122	20130202	179,289	99,672	11	37,206
29	20130202	20130318	4,677	197,936	44	1426,11
30	20130318	20130329	219,867	-10,588	11	30,340
31	20130329	20130409	43,297	41,016	11	154,069
32	20130409	20130420	-142,047	-80,718	11	46,961

B = linha-base, h_a= altitude de ambiguidade

Na Tabela 6.2 encontram-se dispostos os valores da coerência interferométrica e seus respectivos parâmetros estatísticos. Os pares interferométricos com maior coerência são os de número 16, 15, 2, 13 e 20; enquanto os de menor coerência correspondem aos pares de número 9, 3, 22, 17 e 4.

Tabela 6.2 - Parâmetros estatísticos da coerência interferométrica.

Par	Imagem mestre (ano/mês/dia)	Imagem escrava (ano/mês/dia)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
1	20120320	20120331	0	0,982	0.359	0.191
2	20120331	20120411	0	0,992	0.362	0.362
3	20120411	20120422	0	0,950	0.342	0.170
4	20120422	20120503	0	0,963	0.318	0.158
5	20120503	20120514	0	0,985	0.394	0.213
6	20120514	20120525	0	0,974	0.389	0.204
7	20120525	20120605	0	0,966	0.354	0.184
8	20120605	20120616	0	0,985	0.406	0.220
9	20120616	20120627	0	0,933	0.314	0.153
10	20120627	20120708	0	0,969	0.335	0.171
11	20120708	20120719	0	0,983	0.333	0.172
12	20120719	20120730	0	0,969	0.304	0.153
13	20120730	20120810	0	0,991	0.432	0.240
14	20120810	20120821	0	0,963	0.362	0.180
15	20120821	20120901	0	0,993	0.372	0.198
16	20120901	20120912	0	0,995	0.421	0.238
17	20120912	20120923	0	0,958	0.357	0.177

108 Continua

18	20120923	20121004	0	0,988	0.359	0.188
19	20121004	20121015	0	0,969	0.321	0.164
20	20121015	20121026	0	0,989	0.366	0.190
21	20121026	20121106	0	0,961	0.336	0.168
22	20121106	20121117	0	0,953	0.331	0.167
23	20121117	20121128	0	0,988	0.402	0.226
24	20121128	20121209	0	0,987	0.344	0.186
25	20121209	20121220	0	0,984	0.376	0.200
26	20121220	20130111	0	0,967	0.299	0.152
27	20130111	20130122	0	0,987	0.317	0.166
28	20130122	20130202	0	0,985	0.375	0.199
29	20130202	20130318	0	0,987	0.340	0.181
30	20130318	20130329	0	0,979	0.337	0.175
31	20130329	20130409	0	0,985	0.376	0.203
32	20130409	20130420	0	0,977	0.365	0.196
	I		I	I	I	

As Figuras 6.1a e 6.1b e Figura 6.2a e 6.2b correspondem aos mapas de deformação (LoS) obtidos através do processamento interferométrico diferencial, para os períodos seco (18 pares) e chuvoso (14 pares), respectivamente. Nas figuras as cores em vermelho indicam um aumento na distância sensor-alvo (afastamento) e as cores em azul o oposto (aproximação). Pode-se observar nas figuras que em muitos dos mapas de deformação existem grandes variações em LoS, devido principalmente a componente de fase introduzida pela atmosfera, tornando-os praticamente inutilizáveis (e.g. 20120514_20120525, 20121106_20121117, 20121117_20121128). Alguns deles trazem informações úteis, como visto a seguir.

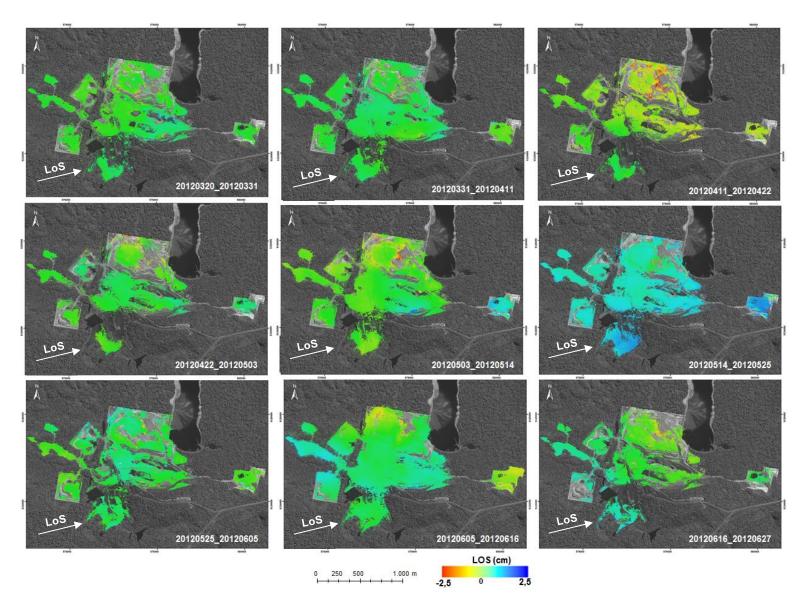


Figura 6.1a - Mapas de deformação LoS para o período seco (20/03/2012 a 27/06/2012) – DInSAR simples.

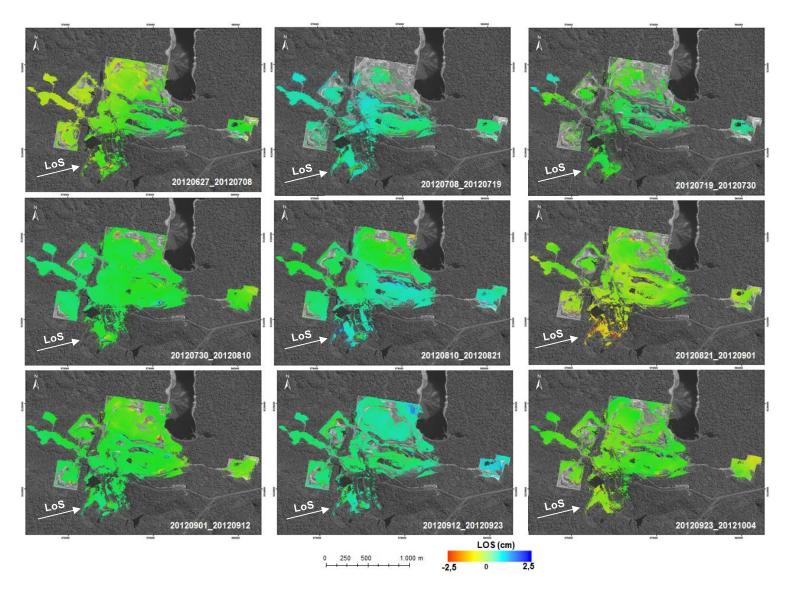


Figura 6.1b - Mapas de deformação LoS para o período seco (27/03/2012 a 04/10/2012) – DInSAR simples.

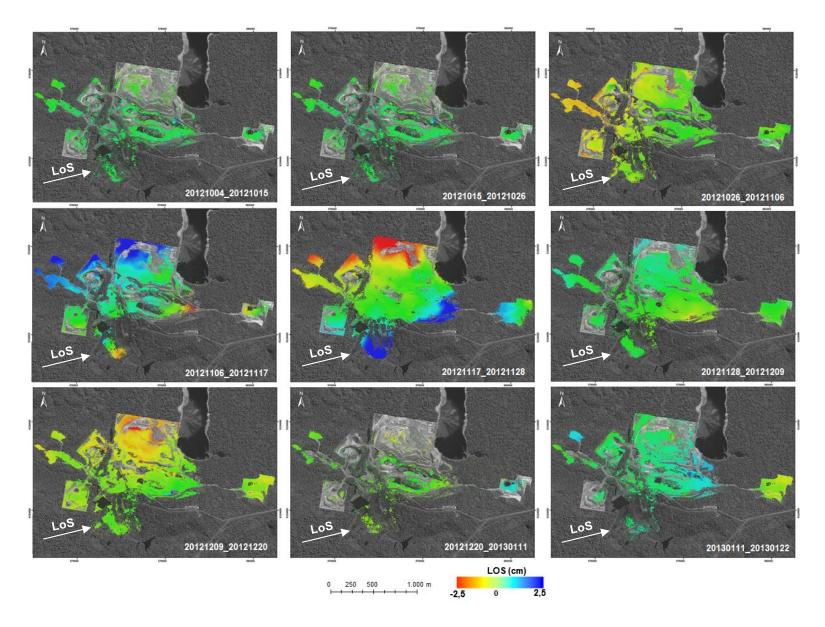


Figura 6.2a - Mapas de deformação LoS para o período chuvoso (04/10/2012 a 11/01/2012) – DInSAR simples.

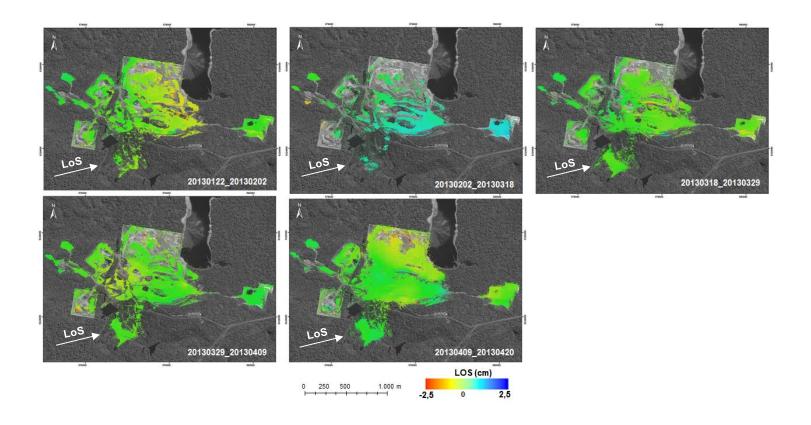


Figura 6.2b - Mapas de deformação LoS para o período seco (22/01/2013 a 20/04/2013) – DInSAR simples.

Na abordagem DInSAR simples alguns mapas de deformação apresentaram algumas informações uteis, como pode ser vista na Figura 6.3, onde 6 pares indicaram deformações nos flancos norte e sul da Mina 1 e na Figura 6.4, onde 6 pares mostraram deformações na pilha de estéril norte.

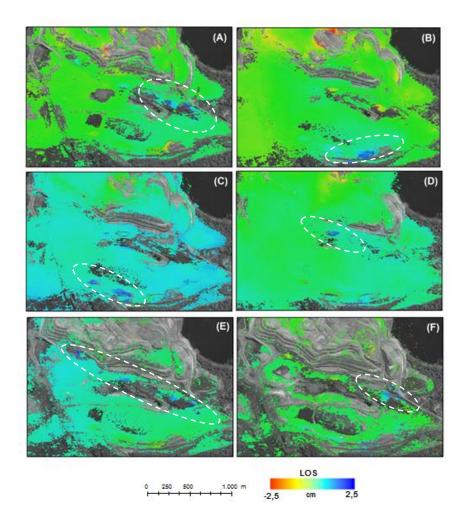


Figura 6.3 - Exemplos de pares interferométricos com deformações nos flancos norte e sul da Mina 1: (a) 20120320_20120331; (b) 20120503_20120514; (c) 20120514_20120524; (d) 20120605_20120616; (e) 20120708_20120719; (f) 20121004_20121015.

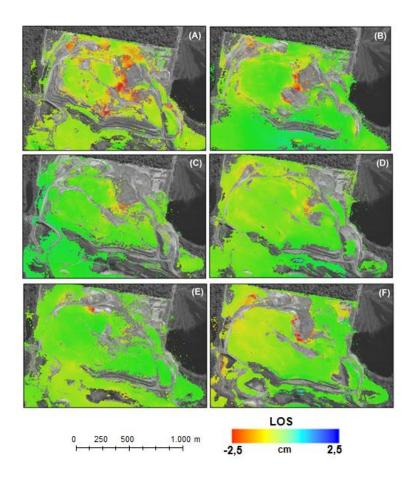


Figura 6.4 - Exemplos de pares interferométricos com deformações na Pilha de Estéril Norte: (a) 20120411_20120422; (b) 20120503_20120514; (c) 20120616_20120627; (d) 20120627_20120708; (e) 20120821_20120901; (f) 20121026_20121106.

6.2 DInSAR Avançada

Para o processamento A-DInSAR foram utilizadas as seguintes abordagens: DInSAR TS e a PSI. Nesses casos, a área da Mina do Manganês do Azul compreende um polígono de 2.500 colunas e 1.750 linhas de imagem. Cada metodologia gerou dois mapas de deformação, um relativo ao período seco e o outro ao período chuvoso.

O ponto de referência (PR) adotado para ambos os processamentos está localizado nas coordenadas 577255,375 m E e 9324042 m N, segundo a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) e o DATUM WGS84 para a Zona 22 Sul (Figura 6.5). O ponto de referência é escolhido na imagem, com a propriedade de ser um PS estável (não ocorre deformação no intervalo da série

temporal de imagens) na área de estudo. Assim, os dados de deformação serão em relação a ele.

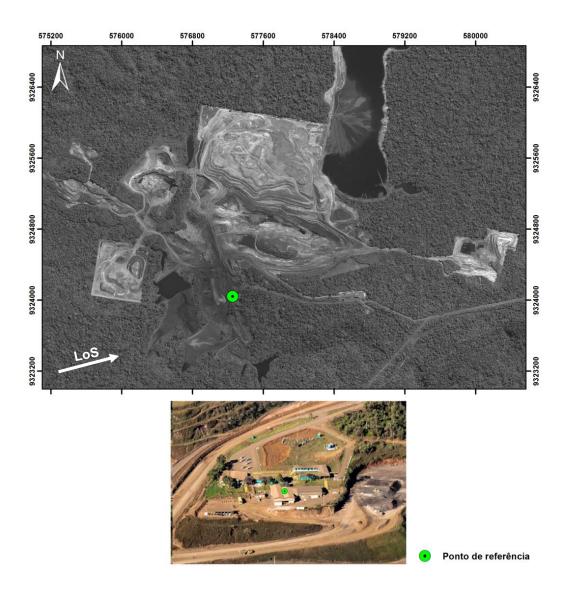


Figura 6.5 - Localização do ponto de referência adotado.

Os itens a seguir fornecem os resultados obtidos através das abordagens interferométricas para ambos os períodos.

6.2.1 Processamento DInSAR TS

6.2.1.1 Período Seco

As imagens do período seco foram corregistradas em função da imagem mestra, do dia 08 de julho de 2012 (Tabela 6.3).

Tabela 6.3 - Imagens selecionadas para o processamento do período seco.

Imagem Mestre	Imagem Escrava (ano/mês/dia)
	20120320
	20120331
	20120411
	20120422
	20120503
	20120514
	20120525
	20120605
	20120616
20120708	20120627
	20120708
	20120719
	20120730
	20120810
	20120821
	20120901
	20120912
	20120923
	20121004

A partir da combinação dos 19 pares de imagens SAR, foram produzidos 32 interferogramas diferenciais, estipulando como valores máximos de linha de base perpendicular 250 m e linha de base temporal equivalente à 55 dias (Figura 6.6).

Radar Image Acquisitions reference SLC: crslc/20120708.rslc.par

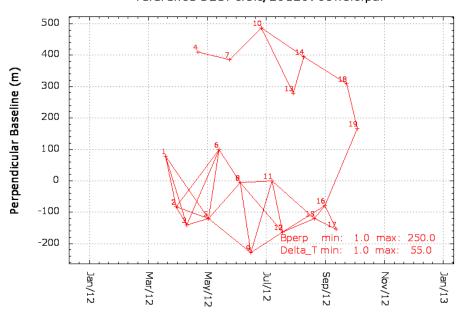


Figura 6.6 - Pares de interferogramas para o período seco.

Assim, o mapa de deformação em LoS para o período seco foi produzido a partir da combinação de 32 interferogramas diferenciais. O mapa de deformação em LoS para o período seco da metodologia DInSAR TS está apresentado na Figura 6.7. Nesse caso, o valor máximo de deformação indicativa de afastamento em relação ao SAR foi de 23,11 cm/ano, e o valor máximo de deslocamento de aproximação ao SAR foi de 10,60 cm/ano.

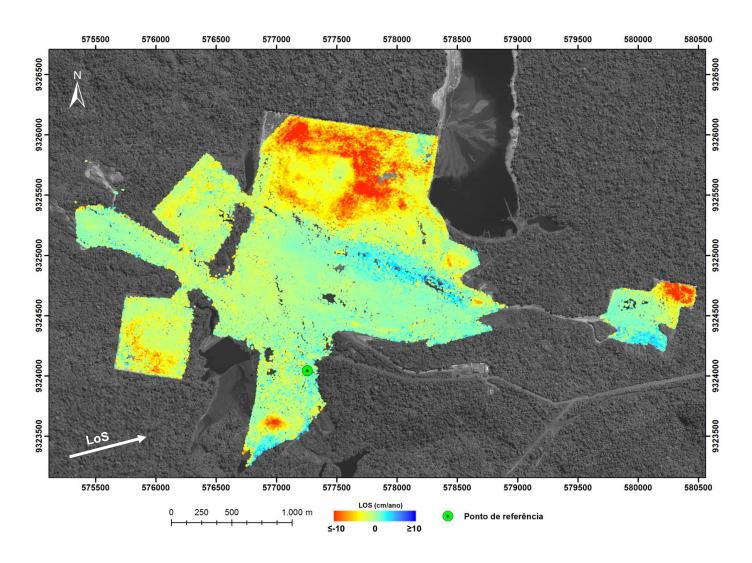


Figura 6.7 - Mapas de deformação LoS para o período seco - DInSAR TS.

As maiores taxas de deformação em toda a mina foram detectadas para a pilha de estéril Norte, com valores indicativos de afastamento em relação ao SAR. Para os taludes de cava, foram encontradas taxas de deformação menores que as medidas na pilha de estéril. Nesse caso, os maiores valores obtidos no flanco norte da cava 1 e indicativos de movimentação em direção ao SAR estão relacionados a siltitos da Formação Águas Claras), material argiloso e pisólitos (Formações Lateríticas) (Figura 6.8).

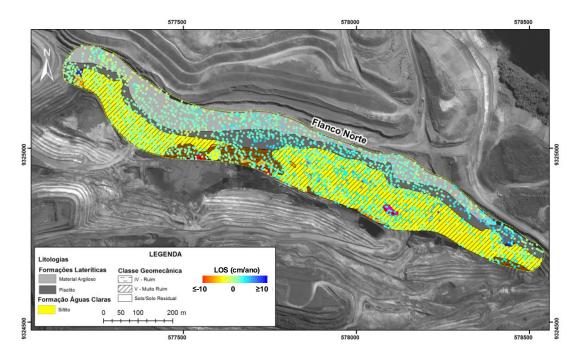


Figura 6.8 - Disposição dos pontos de deformação no flanco norte da Mina 1 - DInSAR TS.

O valor médio dos erros para o período seco é de 1,10 cm/ano. O valor máximo encontrado equivale a 3,71 cm/ano.

6.2.1.2 Período Chuvoso

As imagens do período chuvoso foram corregistradas em função da imagem mestra, do dia 20 de dezembro (Tabela 6.4).

Tabela 6.4 - Imagens selecionadas para o processamento do período chuvoso.

Imagem mestre	Imagem escrava (ano/mês/dia)
	20121004
	20121015
	20121026
	20121106
	20121117
	20121128
	20121209
	20121220
20121220	20130111
20121220	20130122
	20130202
	20130318
	20130329
	20130409
	20130420

Os interferogramas diferenciais para o período chuvoso foram produzidos considerando valores máximos de linha de base perpendicular iguais à 250 m e linha de base temporal equivalente à 45 m (Figura 6.9). No total, foram gerados 27 interferogramas diferenciais.

Radar Image Acquisitions reference SLC: crslc/20121220.rslc.par

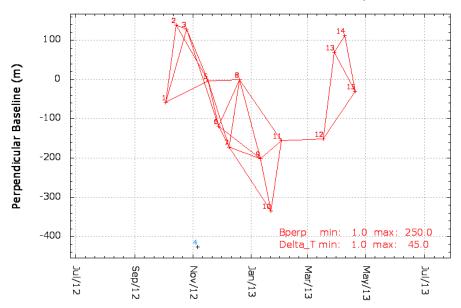


Figura 6.9 - Pares de interferogramas para o período seco.

O mapa de deformação em LoS para o período chuvoso está representado na Figura 6.10. Nesse, os valores máximos para afastamento e aproximação detectados foram -16,01 cm/ano e 9,73 cm/ano, respectivamente.

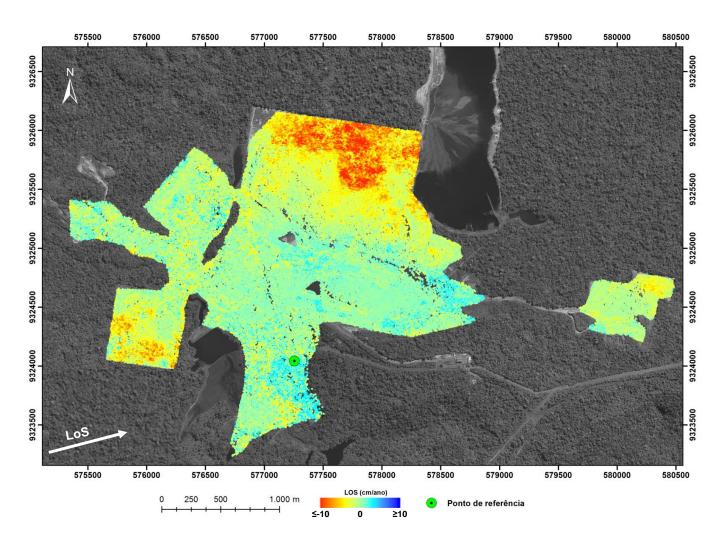


Figura 6.10 - Mapa de deformação LoS para o período chuvoso (22/01/2013 a 20/04/2013) - DInSAR TS.

Assim, como no período seco, as maiores taxas de deformação negativas (que indicam o afastamento do alvo em relação ao SAR) encontram-se na pilha de estéril Norte, enquanto as maiores taxas de deformação positivas (aproximação em relação ao sensor) estão localizadas nos taludes de bancada do flanco norte da Mina 1 (Figura 6.8)

Para o período chuvoso, o valor médio dos erros é de 1,65 cm/ano. O valor máximo encontrado equivale a 5,66 cm/ano.

6.2.2 Processamento PSI

6.2.2.1 Período Seco

A Tabela 6.5 fornece as principais características dos pares interferométricos para o período seco.

Tabela 6.5 - Parâmetros dos pares interferométricos para o período seco.

Imagem Mestre	Imagem Escrava (ano/mês/dia)	B _{perp} médio (m)	B _t (dias)
	20120320	79.39	-110
	20120331	-82.80	-99
	20120411	-140.96	-88
	20120422	411.41	-77
	20120503	-119.80	-66
	20120514	98.88	-55
	20120525	386.88	- 44
	20120605	-6.547	-33
	20120616	-228.91	-22
	20120627	487.23	-11
20120708	20120708	Auto-Interferograma	
	20120719	-163.87	11
	20120730	279.61	22
	20120810	394.86	33
	20120821	-120.72	44
	20120901	-78.20	55

20120912	-154.28	66
20120923	309.99	77
20121004	166.72	88

A Figura 6.11 representa o mapa de deformação em LoS obtido através do processamento PSI utilizando o módulo IPTA do software GAMMA para o período seco. Foram identificados 42.091 PS em uma área de 2,5 km². Esse valor corresponde a aproximadamente 16.836 PS/km².

Analisando os valores de deformação dos PS, o valor máximo de deformação indicativa de afastamento em relação ao SAR foi de 17,16 cm/ano, e o valor máximo de deslocamento de aproximação ao SAR foi de 5,95 cm/ano.

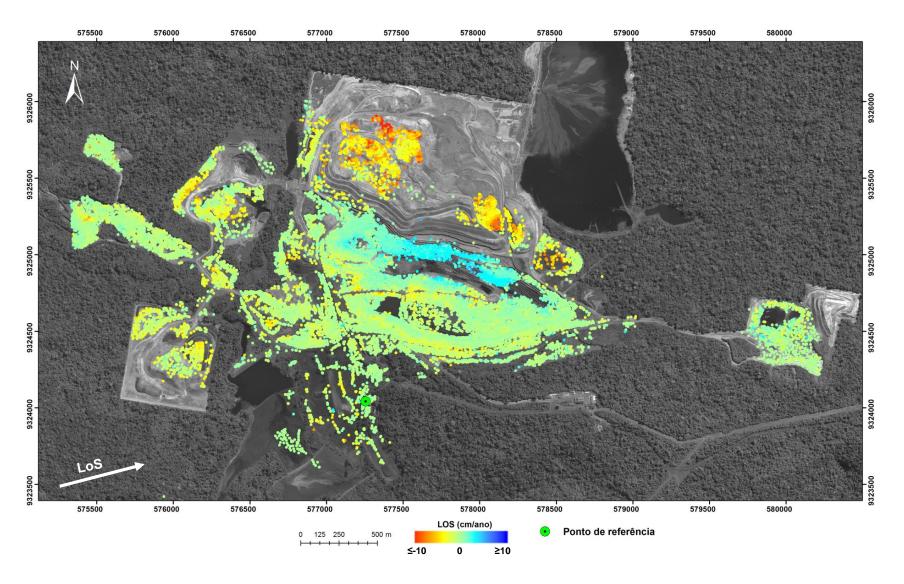


Figura 6.11 - Mapas de deformação LoS para o período seco - PSI.

PS com as maiores taxas de deformação foram detectados para a pilha de estéril Norte, com valores indicativos de afastamento em relação ao SAR. Para os taludes de cava, foram encontrados PS com taxas de deformação menores que os medidos na pilha de estéril. Nesse caso, os maiores valores obtidos no flanco norte da cava 1 e indicativos de movimentação em direção ao SAR estão relacionados a siltitos da Formação Águas Claras), material argiloso e pisólitos (Formações Lateríticas) (Figura 6.12).

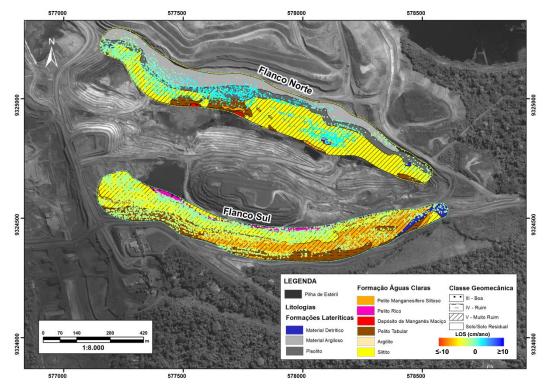


Figura 6.12 - Disposição dos PS nos flancos norte e sul - PSI.

O valor médio dos erros para o período seco é de 0,24 cm/ano. O valor máximo encontrado equivale a 1,69 cm/ano.

6.2.2.2 Período Chuvoso

A Tabela 6.6 fornece as principais características dos pares interferométricos para o período seco.

Tabela 6.6 - Parâmetros dos pares interferométricos para o período chuvoso.

Imagem mestre	Imagem escrava (ano/mês/dia)	B _{perp} médio (m)	B _t (dias)
	20121004	-57,608	-77
	20121015	138,625	-66
	20121026	128,257	-55
	20121106	-426,572	-44
	20121117	-3,592	-33
	20121128	-119,206	-22
	20121209	-172,387	-11
	20121220	Auto-Interferograma	
20121220	20130111	-201,396	22
20121220	20130122	-335,313	33
	20130202	-155,958	44
	20130318	-151,170	88
	20130329	68,691	99
	20130409	111,990	110
	20130420	-30,061	121

A Figura 6.13 representa o mapa de deformação em LoS obtido através do processamento PSI para o período chuvoso. Nesse caso foram identificados 23.862 PS em uma área de 2,5 km². Analisando os valores de deformação dos PS, o valor máximo de deformação indicativa de afastamento em relação ao SAR foi de 14,50 cm/ano, e o valor máximo de deslocamento de aproximação ao SAR foi de 7,75 cm/ano.

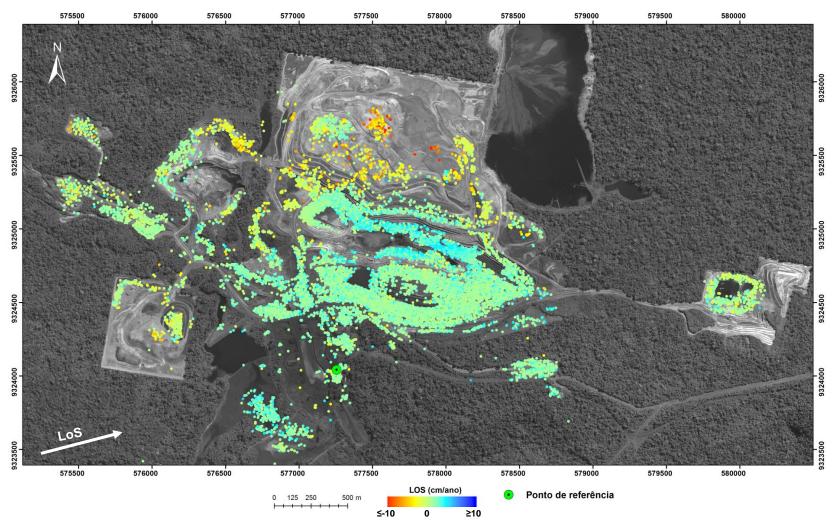


Figura 6.13 - Mapas de deformação LoS para o período chuvoso - PSI.

PS com as maiores taxas de deformação foram detectados para a pilha de estéril Norte, com valores indicativos de afastamento em relação ao SAR. Para os taludes de cava, foram encontrados PS com taxas de deformação menores que os medidos na pilha de estéril. Nesse caso, os maiores valores obtidos no flanco norte da cava 1 e indicativos de movimentação em direção ao SAR estão relacionados a siltitos da Formação Águas Claras), material argiloso e pisólitos (Formações Lateríticas) (Figura 6.14).

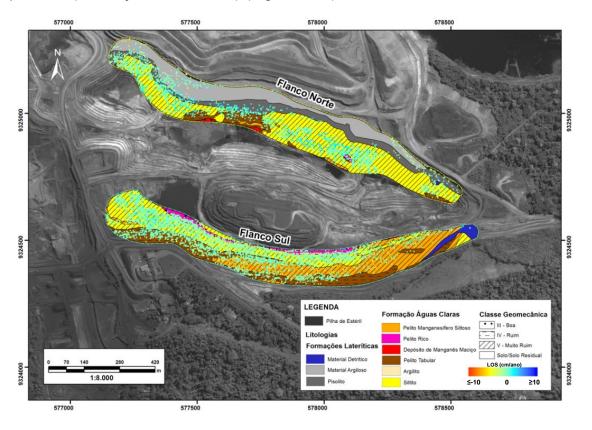


Figura 6.14 - Disposição dos PS nos flancos norte e sul - PSI.

Em relação ao erro, o valor médio para o período chuvoso é 0,51 cm/ano. O valor máximo do erro é 2,96 cm.

7 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS COM DADOS DE SSR

Em uma tentativa de validar os resultados da deformação (LoS) com dados *in situ*, foram utilizadas medidas de radar de campo (SSR), restritas ao monitoramento dos taludes do flanco sul da Mina 1 (Figura 7.1). Apesar do curto período de monitoramento (03 a 08 de agosto de 2012), um padrão de deformação foi detectado, com deslocamento acumulado segundo a LoS de um radar de campo de 1,5 cm.

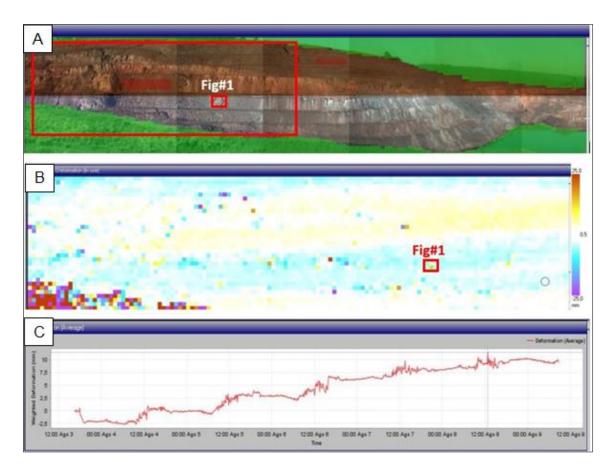


Figura 7.1 - Deformação acumulada (LoS) do SSR: (A) Fotografia digitalizada do Flanco Sul da Mina 1; (B) "Mapa de calor" da deformação da área digitalizada; (c) Perfil da deformação para a área selecionada (retângulo vermelho).

No ArcGIS, as visadas do SSR e TSX-1 foram sobrepostas à ortoimagem GeoEye pancromática, a fim de explorar as relações espaciais entre as visadas dos sensores (Figura 7.2). Na Figura 7.2 é possível observar que as direções das visadas de ambos os radares são quase ortogonais entre si. Assim, a

componente de deslocamento medida ao longo da linha de visada do SSR não seria detectada quando projetada para a linha de visada do TSX-1, uma vez que não é possível detectar deslocamentos no SAR quando orientados ortogonalmente a sua visada (direção em *slant range*).

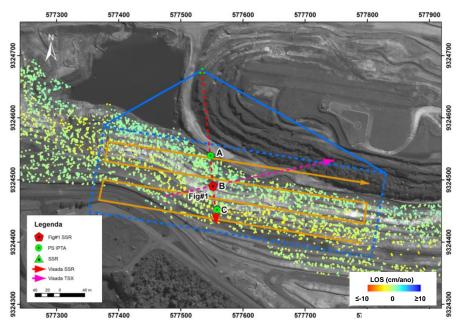


Figura 7.2 - Esquema de geometrias de visada TSX-1 e SSR com dados de deformação (LoS) PSI.

A Figura 7.3 ilustra os perfis de deformação para o TSX-1 de três pontos (A, B, C) especialmente localizados ao longo da visada SSR (de baixo para cima) das bancadas do flanco sul. Os perfis revelaram a presença de deslocamentos indicativos de movimentação afastando-se do SAR, aumentando a partir da base para o topo das bancadas (Ponto A = - 0,37 cm/ano, Ponto B = - 0,70 cm/ano, Ponto C = - 4,21 cm/ano). O Ponto B está localizado no mesmo local onde o perfil SSR foi adquirido (Figura 7.1C) e ambos mostram a mesma tendência linear, com a presença de pequenos movimentos ao longo dos taludes.

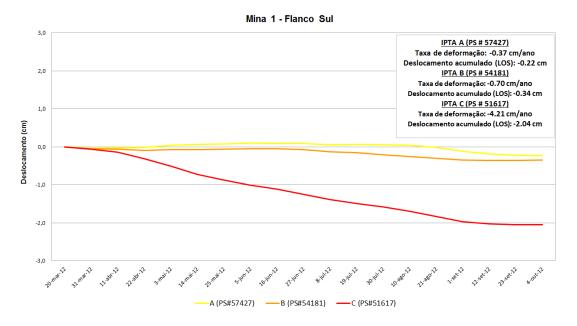


Figura 7.3 - Perfis de deslocamento para três pontos (A, B, C) segundo a visada TSX-1, localizados ao longo da direção de visada SSR no flanco sul.

Para o mapa de deformação (LoS) produzido através da técnica DInSAR TS as visadas do SSR e TSX-1 também foram sobrepostas à ortoimagem GeoEye pancromática (Figura 7.4).

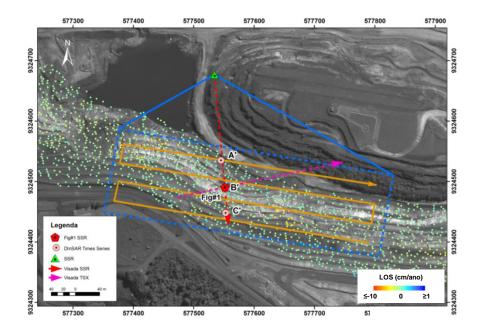


Figura 7.4 - Esquema de geometrias de visada TSX-1 e SSR com dados de deformação (LoS) DInSAR TS.

A Figura 7.5 ilustra os perfis de deformação para o TSX-1 de três pontos (A', B', C'). Os perfis de cada ponto (DS) também revelaram a presença de deslocamentos indicativos de afastamento em direção ao SAR, aumentando a partir da base para o topo das bancadas (Ponto A' = - 0,45 cm/ano, Ponto B' = - 0,47 cm/ano, Ponto C' = - 5,07 cm/ano). O Ponto B, localizado no mesmo local onde o perfil SSR foi adquirido (Figura 7.9C), mostra mesma tendência deformacional. No entanto, o perfil não é linear como o PSI. Isso pode ocorrer devido a erros de desdobramento de fase mais comum nessa segunda abordagem, uma vez que o desdobramento de fase ocorre no domínio espacial.

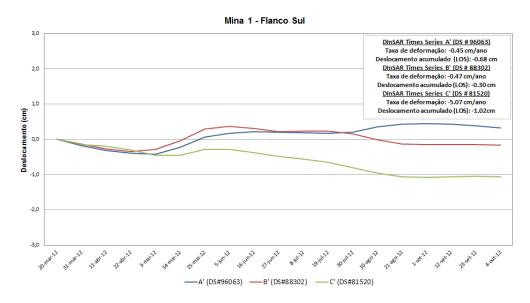


Figura 7.5 - Perfis de deslocamento para três pontos (A', B', C') segundo a visada TSX-1, localizados ao longo da direção de visada SSR da base flanco.

É importante notar que as tendências de deslocamentos detectadas pelo TSX
1 para o flanco sul (afastamento do SAR) e flanco norte (aproximação do SAR) são sugestivas de componentes de pequena movimentação linear dos taludes em direção ao centro da cava. Além disso, as pequenas deformações que foram medidas no campo estão alinhadas ao longo da SSR (LoS), aproximadamente orientada no sentido norte-sul, devido à aquisição de geometria de visualização do radar em terra. Estes deslocamentos poderiam

representar a tendência global do movimento em direção ao centro da cava 1 para o flanco sul.

Para o flanco norte, a aproximação em relação ao SAR pode ser aparecente. Jarosz e Zahiri (2008) explicaram esse fenômeno como elevação não real, ou aparente. De acordo com o esquema da Figura 7.6, o vetor de movimento é resultado de duas componentes: o movimento vertical (subsidência) e o deslocamento horizontal no terreno. Assumindo uma movimentação no sentido do centro da cava, com os componentes vertical e horizontal conforme discutido, o resultado sugere um alçamento aparente do terreno (como mostrado na Figura 7.6).

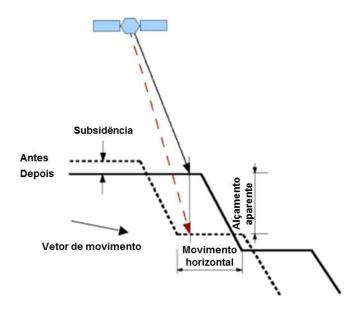


Figura 7.6 – Alçamento aparente do terreno.

Fonte: Jarosz e Zahiri (2008).

8 DISCUSSÕES

As metodologias DInSAR, DInSAR TS e PSI se mostraram eficazes no mapeamento de deslocamentos superficiais na Mina do Maganês do Azul, produzindo resultados, em grande parte, concordantes e complementares.

Os resultados obtidos através da abordagem DInSAR convencional para o período seco foram melhores que os obtidos para o período chuvoso, pois as altas taxas pluviométricas culminam em descorrelação entre os pares de cenas, induzindo assim erros no desdobramento de fase e consequentemente no interferograma.

Por outro lado, os resultados obtidos pelas abordagens DInSAR TS e PSI foram muito satisfatórios. Para a primeira abordagem, as figuras 8.1 e 8.2 apresentam os valores e as localizações dos pontos com as maiores taxas de deformação (LoS) para os taludes de aterro (Pilha Norte) e de corte (flanco norte da Cava 1), assim como os respectivos perfis, para o período seco e chuvoso.

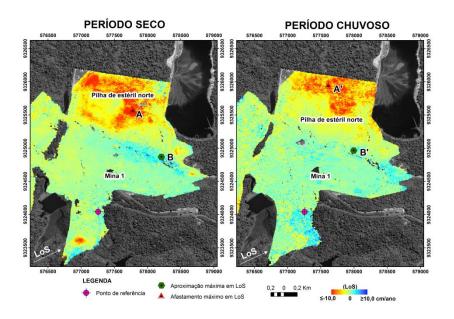


Figura 8.1 - Mapas de deformação (LoS) DInSAR TS para o período seco e chuvoso, onde A e A' indicam o afastamento máximo em relação ao sensor e B e B' a aproximação máxima.

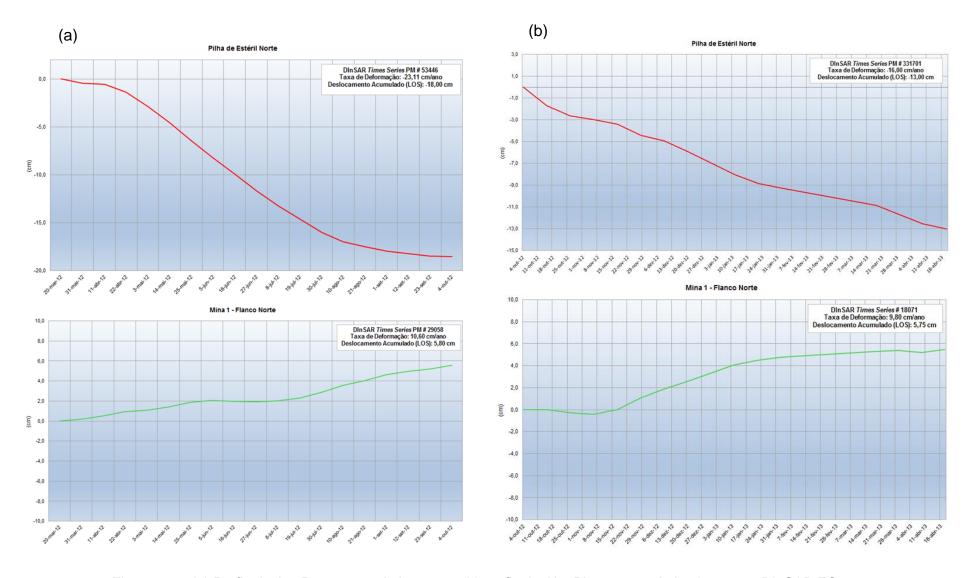


Figura 8.2 - (a) Perfis de A e B para o período seco e (b) perfis de A' e B' para o período chuvoso – DInSAR TS.

Para a abordagem PSI, as figuras 8.3 e 8.4 apresentam os valores e as localizações dos pontos com as maiores deformações (LoS) (Figura 8.1) assim como os respectivos perfis, para o período seco e chuvoso.

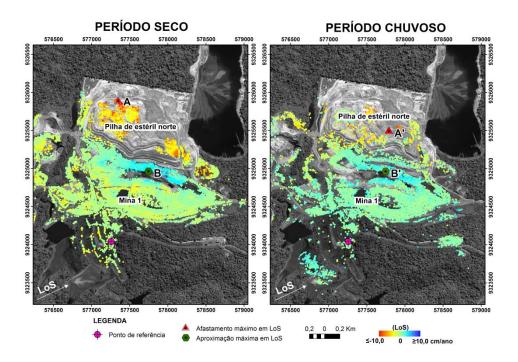


Figura 8.3 - Mapas de deformação (LoS) PSI para o período seco e chuvoso, onde A e A' indicam o afastamento máximo em relação ao sensor e B e B' a aproximação máxima

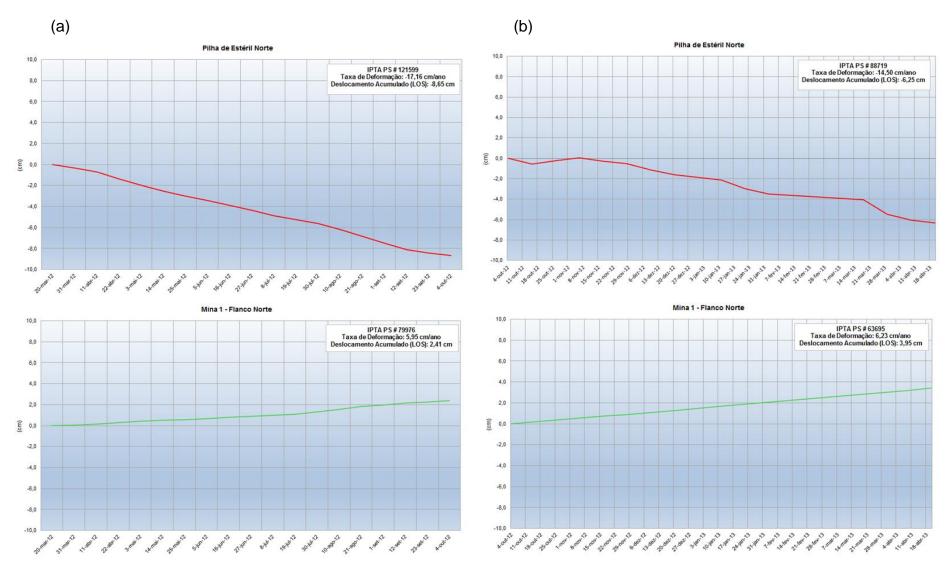


Figura 8.4 - (a) Perfis de A e B para o período seco e (b) Perfis de A' e B' para o período chuvoso - PSI.

As figuras 8.1 e 8.3 indicam que as maiores deformações detectadas corresponderam à movimentação ao longo da LoS em sentido oposto ao SAR, indicativas de subsidência (gradações de cores tendendo do amarelo para o ciano-avermelhado) e interpretadas como recalques na Pilha de Estéril Norte, atingindo valores acumulados de até 17,16 cm no período seco. Na abordagem DInSAR TS é possível observar maior densidade de pontos na Pilha de Estéril Norte. Uma possível hipótese é que o processamento IPTA não detecta movimentos abruptos e maiores que λ/4 cm (ROTT; NAGLER, 2006), o que influenciou nos resultados.

No que se refere aos taludes de bancada, foram obtidos valores, na Mina 1, de deformações significativas refletindo a aproximação em relação ao sensor (coloração azul-clara), predominando nas outras porções, condições gerais de estabilidade da cava e entorno (coloração amarela-verde).

As taxas de deformação detectadas para o período seco foram maiores que para o período chuvoso. Esta variação das taxas de deformação pode ser explicada porque no período da seca há uma maior deposição e compactação (recalque) de material nas pilhas de estéril e nos taludes de cava devido à perda de água e assim, uma maior taxa de deformação deve ser detectada.

Com base nos resultados, constata-se que a Mina do Manganês do Azul permaneceu em sua maioria estável no período entre 2012 e 2013. Os valores de deformação (LoS) para os taludes de bancada e pilhas de estéril são esperados e estão dentro do limiar de segurança da empresa. Os resultados mostram que as taxas de deformação superficiais detectadas são classificadas como muito lentas segundo a IUGS (1995).

As maiores taxas de deformação identificadas nos taludes de bancada da Mina 1 são sugestivas de estarem associadas à fenômenos de relaxação devido ao processo de lavra ocorrendo em domínio de rochas pouco competentes. Nestas regiões afloram predominantemente o siltitos (Formação Águas Claras)

e secundariamente material argiloso e pisólitos (Formações Lateríticas), materiais de baixas qualidades geomecânicas (Classes RMR IV e V), pouco consistentes (R₀, R₁) e muito alterados (W₄ e W₆). Além dessas características, as estruturas geológicas também exercem papel relevante no controle das deformações detectadas nos taludes das três minas.

Segundo o mapa de estrutural da Vale, os PS com as maiores taxas de deformação nos taludes da cava 1 estão espacialmente relacionados com zonas de fraturas, principalmente da Família D, de direção preferencial NE e mergulho para NW (VALE S.A., 2012) (Figura 8.5).

De acordo com o trabalho de Silva (2006), a reativação da Falha Carajás se traduz na área da Mina do Azul pela presença de estruturas deformacionais resultantes de uma fase extensional atuante na região. Essa fase é caracterizada por conjunto de falha normal NW-SE e/ou E-W que dividiu a Mina do Azul em dois blocos principais: um alto a norte e um baixo a sul (Figura 8.6).

O bloco baixo a sul da Mina do Manganês do Azul encontra-se pouco deformado, apresentando acamamento com direção predominante E-W e mergulhos suaves para sul (SILVA, 2006). Nessa porção é possível observar que os PS detectados presentes não apresentam taxas de deformações expressivas, indicando que os taludes permaneceram mais estáveis nessa porção nos dois períodos.

No bloco norte, alto em relação ao sul, a deformação foi mais intensa, com a presença de estruturas como dobras, falhas inversas NW-SE, fraturas e zonas de falhas sub-verticais com direções WNW-SES. A região, definida como um corredor de deformação, apresenta PS com taxas de deslocamentos maiores que os anteriores do bloco baixo, principalmente no flanco norte da Mina 1. Além disso, é possível observar que as taxas de deformação dos PS aumentam, principalmente nas porções proximais à falha, que é associada a uma componte direcional destral relacionada ao episódio de transtensão

destral responsável pela instalação da Falha Carajás anteriormente a 2,6 Ga (PINHEIRO, 1997).

Nesse contexto, o segundo evento de transpressão sinistral afetou zonas estreitas próximas aos planos das falhas principais na área da mina gerando: (1) inversão de algumas falhas normais (2) dobras flexurais de arrastos (3) aumento do ângulo de mergulho dos planos de falhas normais e (4) dobras assimétricas curvilineares resultante do encurtamento NE-SW. Essas estruturas estão representadas nos perfis P01 a P14 da Figura 8.6. Em meio a essas estruturas, os PS permanecem estáveis, com exceção dos PS localizados no meio do corredor de deformação, próximos aos perfis P11 e P12.

Nessa região, PS com altas taxas de deformação mais elevadas foram identificados, estando espacialmente associados à estruturas de orientação NW-SE, representadas por dobras decamétricas a métricas, interrompidas por falhas e fraturas com ângulos sub-verticais em respostas a rotação ao longo dos planos de descontinuidades (SILVA, 2006).

Além disso, na Figura 8.6 é possível observar que a quantidade de PS na porção leste do talude é pequena. Segundo o relatório interno da Vale S.A., é nessa porção que ocorre a surgência de água, contribuindo para a perda de coerência e consequentemente para a redução do número de PS. A surgência ocorre nas fraturas do siltito, unidade hidrogeológica dominante na área (Figura 8.7).

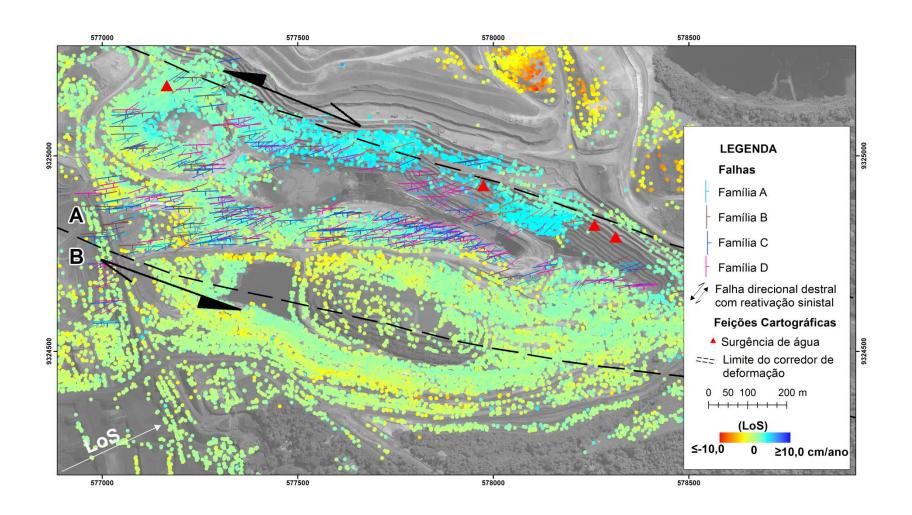


Figura 8.5 - Distribuição dos PS e das estruturas na Mina 1 (período seco).

Fonte: Adaptado de Vale S.A. (2012)

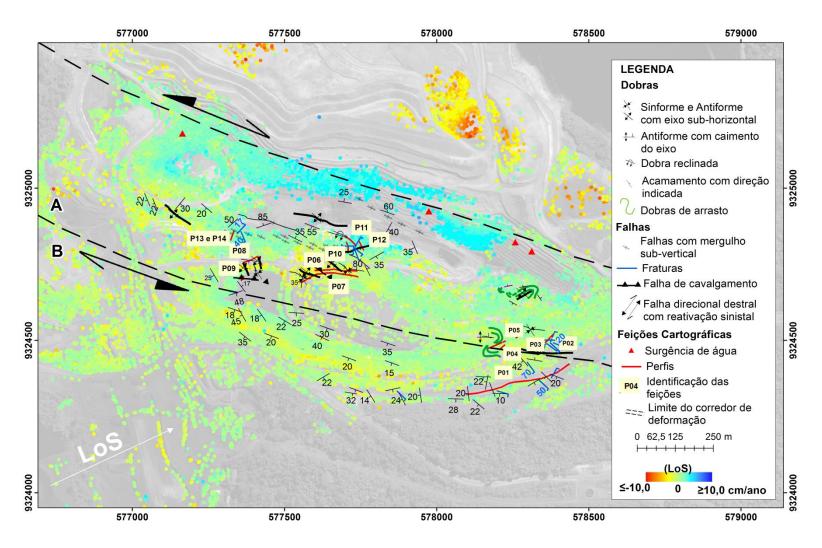


Figura 8.6 - Distribuição dos PS e das estruturas na Mina 1 (período seco).

Fonte: Adaptado de Silva (2006)



Figura 8.7 - Surgência de água nas fraturas do siltito.

Em toda a Mina do Manganês do Azul, houve um considerável decréscimo no número de PS no período chuvoso em relação ao seco. No segundo, aproximadamente 13685 PS foram perdidos em função da perda de coerência. A perda de coerência em minas a céu aberto como as de Carajás é esperada devido a vários fatores (precipitação intensa, mudanças de superfície pelas atividades de lavra, taxas de deformação mais intensas, etc.). As Tabelas 8.1 e 8.2 correlacionam as quantidades de PS detectadas nas quatro classes geomecânicas RMR da área, fornecendo na terceira coluna as densidades, respectivamente nos períodos seco e chuvoso.

Tabela 8.1: Densidade de PS para o período seco.

Classe Geomecânica	Area	Total (Da)	Densidade
	(km²)	Total (Ps)	(Ps/km²)
Boa	0,06	1133	18883,33
Ruim	0,53	5701	10756,60
Muito Ruim	1,38	20962	15189,85
Solo/Solo Residual	0,54	4238	7848,15

Tabela 8.2: Densidade de PS para o período chuvoso.

Classe Geomecânica	Area	Area Total (Ps) (km²)	Densidade
	(km²)		(Ps/km²)
Boa	0,06	670	11166,66
Ruim	0,53	2757	5201,88
Muito Ruim	1,38	12208	8846,38
Solo/Solo Residual	0,54	2714	5025,92

A partir dos resultados expostos nas tabelas acima é possível constatar que em ambos os períodos a maior quantidade de PS está associada às classes geomecânicas com as maiores áreas, porém com menores densidades (Classes IV, V). Isso ocorre porque estas duas unidades estão relacionadas a unidades geomecânicas de baixa qualidade e de atividades de exploração mais intensas. Essas características fazem com que a densidade de PS seja menor. Em contrapartida, as unidades geomecânicas classificadas como boas possuem maior densidade de PS. Esses pontos apresentam baixa variabilidade de intensidade das imagens no conjunto utilizado, funcionando afloramentos rochosos como melhores espalhadores persistentes (FERRETTI et al., 2000).

Por apresentarem as maiores taxas de deformação, nos flancos norte e sul da Mina 1, análises adicionais foram realizadas com o propósito de se avaliar a tendência de estabilidade dos PS detectados nos períodos secos e chuvosos. As Tabelas 8.3A e B e 8.4A e B apresentam alguns resultados quantitativos de estabilidade dos PS, assumindo dois intervalos distintos de deformação acumulada: (a) \leq -0,5 cm (movimentação de afastamento em relação ao SAR) e (b) 0,5 cm até \geq - 0,5 cm (estabilidade). Esses intervalos foram definidos considerando que \pm 0,5 cm foi o desvio padrão da deformação do ponto de referência utilizado no processamento IPTA.

Tabela 8.3a - Características dos PS Flanco Norte (Período Seco).

	Quantidade de		
Classe Geomecânica	PS	%	%
Boa	20	0	100
Ruim	123	0	96
Muito Ruim	1908	2	98
Solo/Solo Residual	1513	2	89

Tabela 8.3b - Características dos PS Flanco Sul (Período Seco).

	Quantidade de	Afastamento	Aproximação
Classe Geomecânica	PS	%	%
Boa	642	10	15
Ruim	1325	71	1
Muito Ruim	4422	55	4
Solo/Solo Residual	136	46	4

Tabela 8.4a - Características dos PS Flanco Norte (Período Chuva).

	Quantidade de	Afastamento	
Classe Geomecânica	PS	%	%
Boa	0	0	0
Ruim	132	6	83
Muito Ruim	732	3	86
Solo/Solo Residual	768	8	72

Tabela 8.4b - Características dos PS Flanco Sul (Período Chuva).

Classe Geomecânica	Quantidade de PS	Afastamento %	Aproximação %
Boa	0	0	0
Ruim	996	65	5
Muito Ruim	3517	61	6
Solo/Solo Residual	19	63	6

Analisando os resultados das tabelas, observa-se uma tendência para ambos os períodos: os PS no flanco norte tendem a se aproximarem do sensor, enquanto os do flanco sul a se afastarem, condizendo com a órbita do TSX-1.

Nesses resultados também é necessário considerar possíveis erros de fase. Os erros de desdobramento de fase são intrínsecos a técnica interferométrica, mas podem ser evitados e minimizados através de procedimentos e processamentos corretos (CROSSETO et al., 2003). De início, a escolha de

cenas do satélite alemão TSX-1, com revisita de 11 dias, foi fundamental para reduzir a descorrelação temporal e espacial e consequentemente possíveis problemas de desdobramento de fase (WEGMULLER et al., 2010). Além disso, o DEM com altamentente preciso formado a partir do par estéreo do sensor GeoEYE-1 também minimizou os problemas de desdobramento de fase.

Nos mapas de deformação em LoS das metodologias DInSAR TS e IPTA é possível observar erros isolados de desdobramento de fase, principalmente no período chuvoso, o que acaretou em dificuldades no processamento interferométrico. Para os mapas de deformação em LoS da técnica DInSAR Simples, os erros são mais frequentes e evidentes. Isso está relacionado a perda de coerência entre os pares interferométricos devido às atividades de lavra. Como dito anteriormente, a eficácia do desdobramento de fase pelo algoritmo MCF, no domínio espacial, depende do alto grau de correlação entre os pixels (CROSSETTO et al., 2003). Sendo assim, a baixa coerência entre o par interferométrico acarreta em graves erros no desdobramento de fase que refletem incosistências no interferograma.

9 CONCLUSÕES

Apenas recentemente, imageamentos orbitais com SAR têm sido utilizados no monitoramento de deformações superficias em estruturas de minas a céu aberto através da interferometria diferencial. A DInSAR fornece medidas quantitativas de deformação com alta precisão (mm/cm), com grande densidade de medições (resolução espacial elevada), cobrindo grandes áreas (visão sinópica), e sem necessidade de instalação de equipamentos de campo.

O monitoramento da estabilidade dos taludes das cavas e das pilhas de estéril da Mina do Manganês do Azul é tópico importante nas atividades operacionais de lavra por razões legais, de segurança (pessoal e equipamento) e dos processos de produção. A baixa qualidade geomecânica das litologias da Formação Águas Claras e da cobertura Laterítica, a presença de estruturas geológicas, a surgência do lençól freático, além das altas taxas pluviométricas da Região Amazônica e o intenso processo de explotação, são fatores que não favorecem a estabilidade geral da lavra.

Através da combinação das abordagens DInSAR simples, DInSAR TS e PSI, foi possível extrair informações de deformação em LoS de cada técnica, que individualmente apresentam suas vantagens e limitações. A metodologia DInSAR simples forneceu a visão mais geral e qualitativa da deformação, que embora possa ser suficiente para algumas aplicações, não se mostrou suficiente para a detecção dos regimes de deformação de precisão presentes na mina. Apesar do melhor resultado com a técnica DInSAT TS em comparação com a DInSAR simples, foram ainda observados erros nas medidas de deslocamento. A abordagem PSI forneceu resultados com maior precisão, porém o processamento é muito mais complexo já que se utilizam algoritmos mais robustos para o desdobramento da fase interferométrica e mapeia a deformação em resolução espacial máxima (full-resolution). Assim, essa é considerada a técnica mais confiável, com precisão milimétrica.

Os mapas de deformação em LoS mostraram que a maioria da Mina de Manganês do Azul, incluindo a infra-estrutura (represa, estrada de ferro, estrada de acesso, etc.) permaneceu estável durante todo o período de tempo da cobertura do TSX-1 (março de 2012 a abril de 2013). De acordo com a equipe os valores da deformação se enquadram no limite de segurança esperado pela equipe de geotecnia da Vale S.A. As deformações presentes na Pilha de Estéril Norte são associadas a recalques. Já as deformações detectadas nos taludes de bancada foram interpretadas como ligadas á fenômenos de relaxação devido a ação da explotação sobre litologias de baixa qualidades geomecânicas e presença de estrururas Os PS com maiores deformações encontram-se no "corredor de deformação", especificamente na porção proximal a falha associada a uma componte direcional destral relacionada ao episódio de transtensão destral responsável pela instalação da Falha Carajás anteriormente a 2,6 Ga.

Portanto, mesmo diante das limitações das técnicas interferométricas (não detectar movimentos abruptos e maiores que λ/4 cm, medir apenas ao longo da linha de visada do SAR, ser muito sensível a descorrelação temporal) os resultados obtidos foram muito satisfatórios, concordando com as medidas e descrições de campo fornecidas pela Vale S.A. Assim, a técnica mostrou-se viável para a detecção de deformações em taludes de cava e de pilhas de estéril em minas a céu aberto como a área de estudo em ambiente tropical.

Para trabalhos futuros recomenda-se o uso de sensores com mais alta revisita, a fim de minimizar erros devido à descorrelação temporal. Como nesse trabalho foi utilizada somente recobrimentos com geometria de visada em órbita ascendente, recomenda-se que pesquisa adicional seja conduzida com uso de visadas descendente e ascendente de modo a minimizar a falta de informação no caso de falha de aquisição de imageamentos (redundância) e permitir a extração dos componentes vertical e horizontal (apenas na direção E-W) da deformação.

REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, J. A. C.; DALL'AGNOL, R.; DIAS, S. B.; ALTHOFF, F. J. Origin of the Archean leucogranodiorite—granite suites: Evidence from the Rio Maria terrane and implications for granite magmatism in the Archean. **Lithos**, v. 187, p. 201-221, 2010.
- AZEVEDO, A. A.; FILHO, J. L. A. Águas subterrâneas. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Eds.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p. 111-130.
- BAMLER, R.; HARTL, P. Synthetic aperture radar interferometry. **Inverse Problems**, v. 14, p. R1-R54, 1998.
- BEISIEGEL, V. R.; BERNARDELLI, A. L.; DRUMMOND, N. F.; RUFF, A. W.; TREMAINE, J. W. Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 3, p. 215-242, 1973.
- BERARDINO, P.; FORNARO, G.; LANARI, R.; SANSOSTI, E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential interferograms. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, p. 2375–2383, 2002.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering rock mass classifications**: a complete manual for engineers and geologists in minning, civil and petroleum engineering. New York: John Wiley and Sons, 1989. 272p.
- BRITO, S. Os taludes da mineração: importância e riscos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. ,Workshop II: Geotecnia e Hidrogeologia Aplicadas à Mineração. **Transparências...**Belo Horizonte: IBRAM, 2011.
- CARVER, K.R.; ELACHI, C.; ULABY, F.T. Microwave remote sensing from space. **Proceedings of the IEEE**, v. 73, p. 970-996, 1985.
- COLESANTI, C.; MOUELIC, L.; BENNANI, M.; RAUCOULES, D.; CARNEC, C.; FERRETTI, A. Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers Technique a case study in the east of France. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, p. 201-207, 2005.
- COLESANTI, C.; FERRETTI, A.; NOVALI, F.; PRATI, C.; ROCCA, F. Monitoring of Progressive and Seasonal Ground Deformation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 7, p. 1685-1701, 2003.
- COLESANTI, C.; WASOWSKI, J. Satellite SAR interferometry for wide-area slope hazard detection and site-specific monitoring of slow landslides. In: INTERNATIONAL LANDSLIDE SYMPOSIUM (ISL2004), 9., 2004, Rio de Janeiro, Brasil. **Proceedings**... Rio de Janeiro (Brazil): [s.n], 2004. v. 1, p. 795–802.

COLESANTI, C.; WASOWSKI, J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. **Engineering geology**, v. 88. p.173-199, 2006.

COSTANTINI, M. A novel phase unwrapping method based on network programming. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 3, p. 813-831, 1998.

COSTA, M. L.; FERNANDEZ, O. J.; REQUELME, M. E. R. Depósito de manganês do Azul Carajás: estratigrafia; mineralogia; geoquímica e evolução geológica. In: MARINI, O.J.; QUEIROZ, E. T.; RAMOS, B.W. (Eds.) Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia. Brasília: DNPM/FINEP/ADIMB, 2005, p. 227-333.

CROSETTO, M.; BIESCAS, E.; DURO, J.; CLOSA, J.; AMAUD, A. Generation of Advanced ERS and Envisat Interferometric SAR Products Using the Stable Point Network Technique. **Photogrametric Enginnering and Remote Sensing**, p. 443-450, 2008.

CROSETTO, M.; CRISPA, B.; BIESCAS, E.; MONSERRAT, O.; AGUDO, M.; FERNANDES, P. Land Deformation Monitoring Using SAR Interferometry: state-of-the-art. **Photogrammetr fernerkundung geoinformation**, v. 6, p. 497-510, 2005.

DARDENNE, M.A.; SCHOBBENHAUS, C. Depósitos minerais no tempo geológico e épocas metalogenéticas. In: BIZZI, ER. (Eds.). **Geologia**; **tectônica e recursos minerais do Brasil**. Brasília: CPRM, 2003. p. 365-448.

DEHLS, J. **Permanent scatterer InSAR processing**: forsmark, Swedish nuclear fuel and waste management Co., Stockholm Sweden, 2006. 34p. SKB Rapport R-06-56.

DIAS, G.S. et al. Datação de zircões de sill de metagabro: comprovação da idade Arqueana da Formação Águas Claras; Carajás - Pará. Belém. In: SBG, SIMP. GEOL. AMAZ., 5, 1996, Belém. **Resumos Expandidos**... Belém, 1996. p. 376-379.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Anuário mineral brasileiro**. 2013. Disponível em: http://www.dnpm.gov.br.

DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. Província Mineral de Carajás - litoestratigrafia e principais depósitos minerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988. Belém. **Anais...** Belém: CVRD-SBG, 1988, p. 11-54.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **InSAR principles**: guidelines for SAR interferometry, processing and interpretation. Noordwijk, The Netherlands: ESA Publications ESTEC (TM-19), 2007. 40p

FABRE, S.; NEDELEC, A.; POITRASSON, F.; STRAUSS, H.; THOMAZO, C.; NOGUEIRA, A. Iron and sulphur isotopes from the Carajas mining province

- (Para; Brazil): Implications for the oxidation of the ocean and the atmosphere across the Archaean, Proterozoic transition. **Chemical Geology**, v. 289, p. 124-139, 2011.
- FERRETTI, A.; FUMAGALLI, A.; NOVALI, F.; PRATI, C.; ROCCA, F.; RUCCI, A. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stack: SqueeSAR; **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 9, p. 3460-3470, 2011.
- FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Unsing Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 5, p. 2202-2212, 2000.
- FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n. 1, p. 8-20, 2001.
- GABRIEL, A. K.; GOLDSTEIN, R. M; ZEBKER, H. A.; Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. B7, p. 9183-9191, 1989.
- GERSCOVICH, D.M.S. **Estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 166p.
- GOLDSTEIN, R.M.; WERNER, C.L. Radar interferogram filtering for geophysical applications. **Geophysical Research Letters**, v. 25, n. 21, p. 4035-4038,1998.
- GOLDSTEIN, R. M.; ZEBKER, H.A.; WERNER, C.L. Satellite radar interferometry two dimensional phase unwrapping. **Radio Science**, v. 23, n. 24, 713–720, 1989.
- GOLUB, G. H.; VAN LOAN, C. **Matriz Computations**, 2nd Edition, The Johns Hopkins University Press, Baltimore, USA, 1989. 300p.
- GOODMAN, R. E. **Introduction to rock mechanics.** 2.ed. New York: Editora John Wiley, ed. 1989. 412p.
- GRAHAM, L. C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, p. 763-768, 1974.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, ed. 1984. 194p.
- GUPTA, R.P. Remote sensing geology. Berlin: Springer-Verlag; 1991. 356p.
- HANSSEN, R.F. **Radar interferometry:** data interpretation and error analysis. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 308p.
- HARTWIG, M.E. Monitoramento de taludes de mineração por interferometria diferencial com dados Terrasar-X na Amazônia: Mina de N4W; Serra de

- Carajás; Pará; Brasil. 2014. 183p. (INPE-12565-TDI/1004). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014. Disponível em: sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/04.14.18.49-TDI.
- HARTWIG, M.E; PARADELLA, W.R.; MURA, J.C. Detection and Monitoring of Surface Motions in Active Open Pit Iron Mine in the Amazon Region; Using Persistent Scatterer Interferometry with TerraSAR-X Satellite Data. **Remote Sensing**, v. 5, p. 4719-4734, 2013.
- HERRERA, G.; TÓMAS, R.; LOPEZ-SANCHEZ, J.M.; DELGADO, J.; MALLORQUI, J.J.; DUQUE, S.; MULAS, J. Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain). **Engineering Geology**, v. 90, p.148-159, 2007.
- HILLEY, G.E.; BÜRGMANN, R.; FERRETTI, A.; NOVALI, F.; ROCCA, F. Dynamics of slow-moving landslides from permanente scatterer analysis. **Science**, v. 304. p. 1952-1955, 2004.
- HIRATA, W.K.; RIGON, J.C.; KADEKARU, K.; CORDEIRO, A.A.C.; MEIRELES, E.M. Geologia da Província Mineral de Carajás. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 1., 1982, Belém. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGEO, 1982. p. 100-108.
- HOEK, E.; BRAY, W. **Rock slope engineering**. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981. 358p.
- HOOPER, A.; ZEBKER, H.; SEGALL, P.; KAMPES, B. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR Persistent Scatterers. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 23, 2004.
- HORBE, A. C.; COSTA, M. L. . Lateritic crusts and related soils in eastern Brazilian Amazonia. **Geoderma**, v. 126, p. 225-239, 2005.
- HUALLANCA, R.E.Z. **Mecanismos de ruptura em taludes altos de mineração a céu aberto**. 2004. 115p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia de são Carlos Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- HUANG, Y; VAN GENDEREN, J. L. Comparison of several multi-look processing procedures in Insar processing for ERS-1&2 tandem mode. In: ERS SAR INTERFEROMETRY "Fringe 96", 1996, Zurich, Switzerland. . **Proceedings...** Paris: ESA, 1997. 215p.
- HUHN, S.R.B.; SANTOS, A.B.S.; AMARAL, A.F.; LEDSHAM, E.J.; GOUVEIA, J.L.; MARTINS, L.B.P.; MONTALVÃO, R.M.G.; COSTA, V.G. O terreno "granito *greenstone*" da região de Rio Maria sul do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988, Belém. 1988. **Anais...** Belém: SBG Núcleo Norte, 1988. v. 3, p. 1438-1452.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Informações e análises

da economia mineral brasileira. 6 Ed. Brasília: IBRAM. 2014.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Estudos geológicos geotécnicos para a caracterização e classificação de maciços rochosos para projetos de engenharia (túneis, lavra a céu aberto e barragens). São Paulo: IPT, 1984.Relatório Interno n. 19569.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM). Suggested method for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties. Oxford: Pergamon Press, 1979. v. 15, p. 81-94.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM). Rock characterization testing and monitoring. E.T.Brown, 1981. 211p.

JUNG, H.C.; KIM, S.W.; JUNG, H.S.; MIN, K. D.; WON, J.S. Satellite observation of coal mining subsidence by persistent scatterer analysis. **Engineering Geology**, v. 92, p.1-13, 2007.

KLEES, R.; MASSONNET, D. Deformation measurements using SAR interferometry: potential and limitations. **Geologie en Mijnbouw**, v. 77, p. 161-176, 1999.

LEWIS, A.J.; HENDERSON, F.M. Radar Fundamentals: the geoscience perspective. In: HENDERSON, F.M.; LEWIS, A.J. (eds.) **Principles & applications of imaging radar –** manual of remote sensing. 3. ed. v. 2, Danvers, MA: John Wiley and Sons, Inc., 1998. p. 131-176.

MACAMBIRA, M. J. B.; LANCELOT, J. Time Constraints for the Formation of the Archean Rio Maria Crust; Southeastern Amazonian Craton; Brazil. **International Geology Review**, v. 38, p. 1134-1142, 1996.

MACHADO,N.; LINDENMAYER, Z.; KROGH, T.E.; LINDENMAYER, D.; U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area; Amazon shield; Brazil. **Precambrian Research**, v. 49, p. 329–354, 1991.

MASSONNET, D.; FEIGL, K. Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms. **Geophysical Research Letters**, v. 22. n. 12. p. 1537-1540, 1995.

MASSONNETT, D.; ROSSI, M.; CARMONA, C.; ADAGNA, F.; PELTZER, G.; FEIGL, K.; RABAUTE, T. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. **Nature**, v. 364, n. 8; p.138–142, 1993.

MEIER, E.; FREI, U.; NUESCH, D. Precise terrain corrected geocoded images. In: Schreier (Ed.). **SAR Geocoding:** data and systems. Karlsruhe: Wichmann., 1993. p. 173-185.

- MIOTO, J.A.; COELHO, L.F.M. Estado de tensão dos maciços rochosos. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p.153-161.
- MOHR, J. J.; MADSEN, S. N. Error analysis for interferometric SAR measurements of ice sheet flow. In; INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS 99), 1999, New York. **Proceedings...** Piscataway, NJ: IEEE, 1999. v. 1, p. 98-100.
- MOREIRA, A.; PRATS-IRAOLA; P.; YOUNIS, M.; KRIEGER, G.; HAJNSEK, I.; PAPATHANASSIOU, K. P. A tutorial on Synthetic Aperture Radar. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, p. 6-43, March 2013.
- MOUGEOT, R. Contrainte geochronologique U-Pb pour large de la formation sedimentare de Águas Claras (Province de Carajás; Est. de Pará.). In: REUNION DES SCIENCES DE LA TERRE, 16., 1996, Orléans. **Anales...** Orléans: BRGM, 1996.
- MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; GAMA F. F.; SANTOS, A.; GALO, M.; CAMARGO O. P.; SILVA, A.Q.; SILVA, G.G. Monitoring of surface deformation in open pit mine using DInSAR time-series: a case study in the N5W iron mine (Carajás, Brazil) using TerraSAR-X data. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING SPIE, 14., 2014, Amsterdan. **Proceedings...** Amsterdan: SPIE, 2014. v. 9243. p. 924311-1.
- NG, A. H.; GE, L.; YAN, Y. LI X.; CHANG, H.; ZHANG, K.; RIZOS, C. Mapping accumulated mine subsidence using small stack of SAR differential interferograms in the Southern coalfield of New South Wales, Australia. **Engineering Geology**, v.115, p.1-15, 2010.
- NG, A.; GE, L.; ZHANG, K.; LI, X. Estimating horizontal and vertical movements due to underground mining using ALOS PALSAR. **Engineering Geology**, v. 158, p.18-27, 2012.
- NOGUEIRA, A.C.R.; TRUCKENBRODT, W.; COSTA, PINHEIRO; R.V.L.. Formação Águas Claras; Pré-Cambriano da Serra dos Carajás. Redescrição e redefinição. **Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi**, v. 7, p. 177-197, 1995.
- ORMAN, M.; PEEVERS, R.; SAMPLE, K. Waste Piles and Dumps. In: DARLING, P. **SME mining engineering handbook.** 3. ed.U.S.: SME, v.1, p. 667-680, 2011.
- OSTIR, K.; KOMAC, M. PSInSAR e DInSAR methodology comparison and their applicability in the field of surface deformations A case of NW Slovenia. **Geologija**, v. 50, n. 1, p. 77-96, 2007.
- PARADELLA W. R.; FERRETTI, A.; MURA, J.C; COLOMBO, D.; GAMA, F. F.; TAMBURINI, A.; SANTOS, A. R.; NOVALI, F.; GALO, M.; CAMARGO, P. O.; SILVA, A. Q.; SILVA, G. G.; SILVA, A.; GOMES, L. L. Mapping surface

- deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis. **Engineering Geology**, v. 193, p. 61-78, 2015a
- PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; SILVA, G. G.; GALO, M.; CAMARGO, P. O.; SILVA, A. Q.. Complementary use of information from space-based DInSAR and field measuring systems for operational monitoring purposes in open pit iron mines of Carajás mining Complex (Brazilian Amazon Region). ISPRS International Archives of the Photogrammetry, **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XL-7/W3, p. 905-911, 2015b.
- PARADELLA, W.R.; CHENG, P. Using Geoeye-1 stereo data in mining application: automatic DEM generation. **Geoinformatics**, v. 16, p.10-12, 2013.
- PARADELLA, W.R.; SILVA, M.F.F.; ROSA, N.A. A geobotanical approach to the tropical rain forest environment of the Carajás Mineral Province (Amazon Region Brazil) based on digital TM and DEM data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, p. 1633-1648, 1994.
- PARADELLA W. R.; FERRETTI, A.; MURA, J.C; COLOMBO, D.; GAMA, F. F.; TAMBURINI, A.; SANTOS, A. R.; NOVALI, F.; GALO, M.; CAMARGO, P. O.; SILVA, A. Q.; SILVA, G. G.; SILVA, A.; GOMES, L. L. Mapping Surface Deformation in Open Pit Iron Mines of Carajás Province (Amazon Region) Using an Integrated SAR Analysis (submetido). **Engineering Geology**, v. 2014, p. 1-18, 2014.
- PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R. Radar Interferometry in Surface Deformation Detection with Orbital Data. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 64, n. 6, p. 797-811, 2012.
- PERSKI, Z.; HANSSEN, R.; WOJCIK, A.; WOJCIECHOWSKI. InSAR analyses of terrain deformation near the Wieliczka Salt Mine, Poland. **Engineering Geology**, v. 106, p. 58-67, 2009.
- PINHEIRO, R. V. L. Reactivation history of the Carajás and cinzento strike slip systems, Amazon, Brazil. 1997. 408p. Ph. D. Dissertation University of Durham, UK, 1997.
- PINTO C.A.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SANTOS, A.; SILVA, G. G. Results of the application of persistent scatterers interferometry for surface displacements monitoring in the Azul open pit manganese mine (Carajás Province, Amazon region) using TerraSAR-X data In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING SPIE, 14, 2014, Amsterdan. **Proceedings...** Amsterdan: SPIE, 2014. v. 9245. p. 92451K-1.
- RANEY, R.K. Radar fundamentals: technical perspective. In: HENDERSON, F.M.; LEWIS, A.J. (Eds). **Principles & applications of imaging radar –** manual of remote sensing. 3. ed. Danvers, MA: John Wiley & Sons, Inc., 1998.

- p. 09-124, v. 2.
- RAUCOLES, D.; MAISONS, C.; CARNEC, C.; LE, MOUELIC S.; KING, C.; Hosford, S. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on Vauvert salt mine (France). **Remote Sensing of Environment**, v. 88, p. 468-478, 2003.
- READ, J.; STACEY, P. **Guidelines for open pit slope design**. Leiden: CRC; 2009. 496p.
- ROCCA, F., Prati, C., Guarnieri, A. M., and Ferretti, A. SAR interferometry and its applications. **Surveys in Geophysics**, v. 21, p. 159-176, 2000.
- ROSEN, P.A.; HENSLEY, S.; JOUGHIN, I.R.; LI, F.K.; MADSEN, S.N.; RODRIGUEZ, E.; GOLDSTEIN, R.M. Synthetic Aperture Radar Interferometry. **Proceedings of the IEEE**, v. 88, p. 333-382, 2000.
- ROTT, H.; NAGLER, T. The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards. **Advances in Space Research**, v.37. p. 710-719, 2006.
- SABATER, J.R.; DURO, J.; ARNAUD, A.; ALBIOL, D.; KOUDOGBO, F.N. Comparative analyses of multi-frequency PSI ground deformation measurements. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING SPIE, 2011. Prague, Czech Republic. 2011. **Proceedings...** Prague: SPIE, 2011. v. 8179. p. 81790M 81790-12M.
- SANSOSTI, E.; BERARDINO, P.; BONANO, M.; CALÒ, F.; CASTALDO, R.; CASU, F.; MANUNTA, M.; MANZO, M.; PEPE, A.; SOLARO, G.; TIZZANI, P.; ZENI, G.; LANARI, R. How second generation SAR systems are impacting the analysis of ground deformation. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 28, p. 1-11, 2014.
- SANTOS, J.O.S. Geotectônica do escudo das Guianas e Brasil-Central. In: BIZZI, L.A. et al. (Eds.). **Geologia; tectônica e recursos minerais do Brasil:** texto; mapas e SIG. Brasília: CPRM: 2003. p. 169-226.
- SCHÄFER, M.; WALTER, D.; BUSCH, W. DInSAR. Ground movement monitoring in the rural environment of an open pit mining area. In: ENVISAT SYMPOSIUM, 2007, Montreux, Switzerland. **Proceedings...** Montreux: ESA, 2007. (ESA SP-636, July 2007), v. 23, p. 3P15-EOMD.
- SERRA JÚNIOR, E.; OJIMA, L.M. Caracterização e classificação de maciços rochosos. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p. 211-226.
- SHi, Z.; FUNG, K. B. A Comparison of digital speckle filters. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 1996, Lincoln, Nebraska, USA. **Proceedings...** Piscatyway, NE: IEEE, 1996. p. 2129-2133.

- SILVA, C. M. G.; VILLAS, R. N. 1998. The Águas Claras Cu-sulfide ± Au deposit; Carajás region; Pará; Brazil: geological setting; wall-rock alteration and mineralizing fluids. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 3, p. 315-326, 1998.
- SILVA, D. D. C. Mapeamento estrutural das rochas arqueanas expostas na Mina do Igarapé Azul Carajás PA. 2006. 81p. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, 2006.
- SILVA, C. M. G.; VILLAS, R.N. The Águas Claras Cu-sulfide ± Au deposit; Carajás region; Pará; Brazil: geological setting; wall-rock alteration and mineralizing fluids. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 3, p. 315-326.
- SOUZA, C. S.; COSTA, A. F.; COSTA, R. T.; DANIEL, P. H. Locação de poços de rebaixamento de nível d'água utilizando geologia e o método geofísico de imageamento elétrico bidimensional na mina de manganês do azul Província Mineral de Carajás PA. In: ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS II SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO SUDESTE, SÃO PAULO, 14., 2005, São Paulo. **Anais Eletrônicos...**Disponível em: http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23213/15324.
- STROZZI, T.; WEGMULLER, U.; WERNER, C.; WIESMANN, A. Measurement of slow uniform surface displacement with mm/year accuracy. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM IGARSS, 2000, Honolulu, U.S. 24-28 Jul. **Proceedings...** Honolulu: IEEE, 2000. v. 5. p. 2239 2241.
- TASSINARI, C.C.G. e MACAMBIRA, M.J.B. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: MANTESSO-NETO, V. et al. (Eds.). **Geologia do continente Sul-americano:** evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004. p. 471-485.
- TOFANI, V.; SEGONI, S.; AGOSTINI, A.; CATANI, F.; CASAGLI, N. Use of remote sensing for landslide studies in Europe. **Natural Hazards Earth System Science**, v. 13, p. 299–309, 2013.
- TRENDALL, A.F.; BASEI, M.A.S.; LAETER, J.R.; NELSON, D.R. SHRIMP zircon U-Pb constraints on the age of the Carajás formation; Grão Pará Group; Amazon Craton. **Journal of South American Earth Science**, v.11, n. 3. p. 265-277, 1998.
- TRIPOLITSIOTIS, A; STEIAKAKIS, C; PAPADAKI E; AGIOUTANTIS, Z; MERTIKAS, S; PANAGIOTIS, P. Complementing geotechnical slope stability and land movement analysis using satellite DInSAR. **Central European Journal of Geosciences**, v. 6, p. 56-66, 2014.
- ULABY, F. T.; MOORE, R.K.; FUNG, A.K. Microwave remote sensing active

- and passive: from theory to applications. North Bergen, NJ: Book-Mart Press, v. 3, p. 1065-2162, 1986.
- USAI, S. A least-squares approach for long-term monitoring of deformations with differential SAR interferometry.In: IGARSS, 2002, Toronto, Canada. **Proceedings...** Toronto, Canada: IEEE,2002. p.1247-1250.
- VALARELLI, J.V.; BERNADELLI, A.L.; BEISIEGEL, R.W. Aspectos genéticos do minério de manganês do Azul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2., 1978, São Paulo. **Anais..** São Paulo: SBGEO, 1978. v. 30, p. 1670-1679.
- VALE S.A. Monitoramento Geotécnico com SSR: Flanco Norte e Sul, Mina 1, Mina do Mn do Azul. Rio de Janeiro, 2012. 7p. Relatório Interno da VALE S.A.
- VALE S.A. Estudo geotécnico para geometria com bancadas de 8m Mina do Manganês do Azul. Rio de Janeiro, 2011. 8p. Relatório Interno da VALE S.A.
- VALE S.A. Mapeamento litoestrutural e litogeomecânico da Mina 1 DO Manganês do Azul. Rio de Janeiro, 2012. 74p. Relatório Interno da VALE S.A.
- VASQUEZ, M. L.; ROSA-COSTA, L.T. Geologia e recursos minerais do Estado do Pará. In: _____. (Org.). **Geologia e recursos minerais do Estado do Pará :** Sistema de Informações Geográficas SIG : texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Escala 1: 1.000.000. Belém: CPRM, 2008. 328p.
- VAZ, L. F. Classificação Genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais. **Solos e Rochas**, v. 19, p. 117-136, 1996.
- VAZIRI, A.; MOORE, L.; ALI, H. Monitoring systems for warning impending failures in slopes and open pit mines. **Natural Hazards**, v. 55. p.510-512, 2010.
- VENEZIANI, P.; SANTOS, A.R.; PARADELLA, W.R. A evolução tectono estratigráfica da Província Mineral de Carajás: um modelo com base em dados de sensores remotos orbitais (SAR-C RADARSAT-1; TM Landsat-5); aerogeofísica e dados de campo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, p. 67-78, 2004.
- VOGBR. Projeto Executivo das Pilhas de Estéril (PDE) das Minas 1, 2 e 3 da mina do manganês do azul. Belo Horizonte, 2008. 69p. Relatório Interno da VALE S.A.
- WEGMÜLLER, U.; WALTER, D.; SPRECKELS, V.; WERNER, C. Non-uniform ground-motion monitoring with TerraSAR-X persistent scatterer interferometry. **IEEE Geoscience and Remote Sensing**, v. 48, p. 895-904, 2010.
- WEGMÜLLER, U.; WERNER, C.; STROZZI, T.; WIESMANN, A. Multi-temporal interferometric point target analysis. In: SMITS; P.; BRUZZONE; L. (eds.).

Analysis of multi-temporal remote sensing images. Hoboken; N.J.: World Science, v. 3, p. 136-144, 2004.

WERNER, C.; WEGMULLER, U.; STROZZI; T.; WIESMANN; A. Interferometric point target analysis for deformation mapping. In: IGARSS*03; 2003; Toulouse; France. **Proceedings...** Toulouse: IEEE, v. 7, p. 4362-4364, 2003.

WERNER, C.; WEGMULLER, U.; STROZZI, T.; WIESMANN, A. Gamma SAR and interferometric processing software. ERS-ENVISAT SYMPOSIUM, Gothenburg; Sweden. 16-20 Oct. **Proceedings...** Gothenburg: ESA, 2000.

WOODHOUSE, I. H. **Introduction to microwave remote sensing**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. 370p.

YANG, C.; Zhang, Q.; Zhao, C.; Ji, L.; Zhu, W. Monitoring mine collapse by D-InSAR. **Mining Science and Technology**, v. 20, p. 696-700, 2010.

ZEBKER, H; VILLASENOR, J. Decorrelation in interferometric radar echoes. **IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing**, v. 5, p. 950-959, 1992.

ZEBKER, H.A.; ROSEN, P.A.; GOLDSTEIN, R.M.; GABRIEL, A.; WERNER, C.L. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. **Journal of Geophysical Research-Solid Earth**, v. 99, p. 19617-19634,1994.

ZEBKER, H.A.; VILLASENOR, J. Decorrelation in interferometric radar echoes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, p. 950-959, 1992.

ZHENFANG, L.; ZHENG, B.; ZHIYONG, S. A joint image coregistration; phase noise suppression and phase unwrapping method based on subspace projection for multibaseline InSAR systems. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, p. 584-591, 2007.

ZHOU, X.; CHANG; N.B.; LI; S. Applications of SAR interferometry in Earth and environment science research. **Sensors**, v. 9, p. 1876-1912, 2009.